

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
(повне найменування інституту, факультету)

КАФЕДРА ХІМІЧНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ КЕРАМІКИ ТА СКЛА
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК 666.189.3

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ **Б.Ю. Корнілович**
(підпис) (ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 2018 р.

Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія»
(код та назва спеціальності)

за спеціалізацією «Хімічні технології неорганічних керамічних матеріалів»
на тему **“Застосування віконного бою для виробництва піноскла”**

Виконав: студент 2 курсу, групи ХМ-71 мп

Самонова Анастасія Олександрівна
(прізвище, ім'я, по батькові)

_____ (підпис)

Керівник **доцент кафедри ХТКС, доцент, к.х.н. Спасьонова Л.М.**

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Консультанти:

_____ (назва розділу)

_____ (вчені ступінь та звання, прізвище, ініціали)

_____ (підпис)

_____ (назва розділу)

_____ (вчені ступінь та звання, прізвище, ініціали)

_____ (підпис)

_____ (назва розділу)

_____ (вчені ступінь та звання, прізвище, ініціали)

_____ (підпис)

Рецензент **доцент кафедри ХТКМ, доцент, к.т.н. Токарчук В.В.**

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному проекті
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань

Студент _____
(підпис)

Київ - 2018 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

(повне факультету)

КАФЕДРА ХІМІЧНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ КЕРАМІКИ ТА СКЛА

(повна назва кафедри)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

за **освітньо-професійною** програмою

Спеціальність – 161 «Хімічні технології та інженерія»

Спеціалізація – «Хімічні технології неорганічних керамічних матеріалів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ **Б.Ю. Корнілович**
(підпис) (ініціали, прізвище)

«___» _____ 2018 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Самоновій Анастасії Олександрівні

1. Тема дисертації «Застосування віконового бою для виробництва піноскла»
науковий керівник дисертації доцент кафедри ХТКС, доцент, к.х.н.
Спасьонова Л.М. затверджені наказом по університету від «07» листопада
2018 р. № 4099-с
2. Термін подання студентом дисертації _____
3. Об'єкт дослідження: Теплоізоляційне піноскло
4. Предмет дослідження: Виготовлення теплоізоляційного піноскла с відходів
виробництва листового скла.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити

Дослідження фізико-хімічних процесів перебігу спінювання скла. Розробка точки будівництва підприємства. Методи дослідження піноскла на згин, водопоглинання, пористість.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: характеристика об'єкту дослідження, генеральний план підприємства, технологічна схема виробництва, план цеху, основний теплотехнологічний агрегат, схема автоматизації.

7. Орієнтовний перелік публікацій _____

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Стартап-проект	Тюленєва Ю. В., доцент		
Охорона праці	Полукаров Ю. О., доцент		
Автоматизація	Бородін В. І., асистент		

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Патентний та бібліографічний пошук		
2	Вивчення методів дослідження піноскла		
3	Оптимізація технологічної схеми виробництва		
4	Вибір точки забудови. Створення плану заводу		
5	Аналіз кінетики спінювання піноскла. Вибір оптимальних параметрів (тривалості витримки та температури) для виготовлення піноскла з відходів листового скла		
6	Оптимізація параметрів спінювання піноскла		
7	Обробка результатів		
8	Написання дисертації, оформлення додаткових матеріалів		

Студент

Самонова А.О.

Науковий керівник дисертації

Спасьонова Л.М.
(ініціали, прізвище)

(підпис)

РЕФЕРАТ

Об'єм – 122 стр. рис. - 31 , табл. - 21, посилань – 54, додаток А, додаток Б.

Об'єкт розроблення – проектування ділянки з виробництва піноскла з застосуванням віконного склобою.

Мета роботи – проектування підприємства, що виробляє тепло- та звукоізоляційні блоки з відходів виробництва листового скла, а також розробка інноваційного стартап проекту для отримання швидкого прибутку.

Для виробництва піноскла використовуються відходи виробництва листового скла. Можливе також використання власного зворотного склобою основного виробництва машинно-ванного цеху.

В роботі виконаний проект печі спінювання і печі відпалу.

В температурному інтервалі $840 \div 860$ °C і при тривалості спінювання $20 \div 30$ хвилин можна отримати піноскло, яке за своїми характеристиками може бути рекомендоване для промислового виготовлення. Можуть бути отримані наступні експлуатаційні характеристики: об'ємна маса - $0,15 \div 0,2$ г/см³; міцність на згин - $0,2 \div 0,5$ МПа; водопоглинання – $2,0 \div 4,5$ %; ударна в'язкість - $0,005 \div 0,015$ Дж/см²; пористість - $91 \div 95$ %.

Ключові слова: ПІНОСКЛО, ТЕМПЕРАТУРНИЙ РЕЖИМ, ТЕХНОЛОГІЧНА ЛІНІЯ, СКЛОВАРНА ПІЧ.

SUMMARY

Volume 122 pages, fig. - 31 , tab.- 21 , references - 54 titles, annex A, annex B.

Object of the research - design of a foam glass production site with the use of window glass cullet.

Target of work - designing an enterprise that produces heat- and sound-insulation blocks from the sheet glass production wastes, as well as to develop an innovative start-up project for a quick income.

Sheet glass waste is used to produce foam glass. It is also possible to use own glass waste for the main production of the machine-bath shop.

The furnace of foaming and annealing furnace project was designed in this work.

In the temperature range of $840 \div 860$ °C and with a sponge duration of $20 \div 30$ minutes it is possible to obtain a foam glass, which according to its characteristics can be recommended for industrial production. The following performance characteristics can be obtained: volume mass $0,15 \div 0,2$ g / cm³; bending strength $0,2 \div 0,5$ MPa; water absorption - $2,0 \div 4,5\%$; impact strength $0,005 \div 0,015$ J / cm²; porosity $91 \div 95\%$.

Keywords: FOAM GLASS, TEMPERATURE MODE, TECHNOLOGICAL LINE, GLASS FURNACE.

ЗМІСТ

		Стор.
	ВСТУП.....	8
1	ВИРОБНИЦТВО ПІНОСКЛА В СВІТІ ТА В УКРАЇНІ....	10
1.1	Стан виробництва в галузі хімічної технології піноскла.....	10
1.2	Огляд існуючих технологій та методів виготовлення продукції з піноскла.....	16
2	ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА.....	32
2.1	Вибір та обґрунтування точки будівництва	32
2.2	Асортимент та вимоги стандартів.....	34
2.3	Характеристика сировини, допоміжних матеріалів, енергетичних носіїв.....	36
2.4	Обґрунтування вибору технологічної схеми та способу виробництва.....	38
3	ТЕОРІЯ, ТЕХНІКА І МЕТОДИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	40
3.1	Виготовлення дослідних зразків.....	40
3.2	Вивчення режиму спінювання модельних зразків.....	41
3.3	Визначення пористості та об'ємної маси зразків.....	42
3.4	Визначення водопоглинання.....	44
3.5	Визначення ударної в'язкості.....	45
3.6	Визначення міцності на згин.....	48
3.7	Проведення випробувань.....	48
3.8	Обробка результатів випробувань.....	49
4	ВИГОТОВЛЕННЯ ПІНОСКЛА.....	50
4.1	Дослідження шихти диференційно термічним методом аналізу.....	50
4.2	Дослідження шихти термогравіметричним методом аналізу...	51
4.3	Визначення режиму спінювання модельних зразків.....	54
4.4	Оптимізація температурних параметрів та тривалості процесів	56
4.5	Визначення об'ємної маси зразків піноскла.....	58
4.6	Дослідження взаємодії зразків піноскла з водою.....	58
4.7	Дослідження водопоглинання отриманих зразків піноскла.....	60
4.8	Дослідження пористості отриманих зразків піноскла.....	61
4.9	Дослідження ударної в'язкості отриманого піноскла	62
4.10	Дослідження отриманих зразків піноскла на міцність на вигин	62

					ДП.ХМ7112.1111.001ПЗ			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Застосування віконного бою для виготовлення піноскла			
Розроб.	Самонова А.О							
Перевір.	Спасьонова Л.М.							
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.	Корнілович Б.Ю.				КПІ імені Ігоря Сікорського група ХМ-71мп			
					Літ. Арк. Акрушів			

5	ЗАВОД З ВИРОБНИЦТВА ЛИСТОВОГО СКЛА ТА ДІЛЯНКА З ВИРОБНИЦТВА ПІНОСКЛА.....	64
5.1	Вхідні дані.....	64
5.2	Теплообмін по симетрії нагрівання.....	67
5.3	Оптимізація температурного режиму термообробки.....	67
5.4	Тепловий розрахунок печі. Вихідні дані теплового розрахунку.....	69
5.4.1	Тепловий баланс зони спінювання. Статті надходження.....	70
5.4.2	Тепловий баланс зони спінювання. Статті витрат.....	72
5.5	Підсумок теплового балансу.....	80
5.6	Технічні рішення з промислового впровадження проекту.....	84
5.7	Сировина і її підготовка.....	84
5.8	Піноутворення.....	85
5.9	Відпал піноблоків і кінцеві операції.....	91
6	КОНТРОЛЬ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИРОБНИЦТВА ПІНОСКЛА ТА АВТОМАТИЧНЕ РЕГУЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ.....	95
6.1	Опис технологічної схеми підготовки піноутворюючої суміші.....	96
6.2	Аналіз технологічного процесу як об'єкта автоматизації.....	96
6.3	Опис розробленої схеми автоматизації.....	97
6.4	Специфікація устаткування, виробів та матеріалів.....	98
7	ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ НА ВИРОБНИЦТВІ. ПИТАННЯ ЕКОЛОГІЇ.....	99
7.1	Виявлення та аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів на проектному об'єкті. Заходи з охорони праці.....	99
7.1.1	Повітря робочої зони.....	102
7.1.2	Виробниче освітлення.....	103
7.1.3	Виробничий шум та вібрації.....	104
7.1.4	Електробезпека.....	105
7.1.5	Безпека технологічних процесів і обслуговування устаткування.....	107
7.2	Пожежна безпека.....	108
8	СТАРТАП-ПРОЕКТ.....	111
8.1	Технологічна підготовка виробництва.....	111
8.2	Розвиток та впровадження стартап-проекту.....	115
	ВИСНОВКИ.....	116
	СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	118
	ДОДАТОК А.....	
	ДОДАТОК Б.....	

ВСТУП

Спінене скло за комплексом властивостей не має аналогів, це універсальний теплоізоляційний матеріал. Піноскло має властиві тільки йому унікальні теплофізичні та експлуатаційні властивості. Широкий температурний діапазон застосування, абсолютна непроникність для води і водяної пари, негорючість, стабільність розмірів (не дає усадку), стійкість до агресивних середовищ, в тому числі до кислот, високі показники міцності - все це підтверджує доцільність використання піноскла в багатьох сферах нашого життя.

Унікальна сукупність властивостей спіненого скла дозволяє досить широко використовувати даний матеріал. Він використовується головним чином в будівництві і житлово-комунальному комплексі як теплоізоляційний матеріал, а також в сільському господарстві, енергетиці, машинобудуванні, хімічній і нафтохімічних галузях, харчовому, паперовому, фармацевтичному та інших виробництвах. Цей матеріал збільшує надійність конструкцій і економить кошти. Піноскло застосовується навіть там, де застосування інших теплоізоляційних матеріалів ускладнене, малоефективне або навіть неможливе.

Низька щільність при високій міцності зменшує навантаження на фундамент і дозволяє будувати навіть на слабких ґрунтах, надбудовувати верхні поверхи будівель, виготовляти понтонні і інші плавучі засоби. Завдяки низькій щільності піноскло незамінне для теплоізоляції перекриття, підлог, виготовлення наповнювачів для легковагових панелей.

Блоки з піноскла - міцна негорюча теплоізоляція, завдяки цьому вони мають перевагу при використанні у кріогенній техніці, на пожежо- і вибухонебезпечних виробництвах, особливо важливих капітальних об'єктах. Негорючість дає можливість використовувати його для теплоізоляції у висотному будівництві, ізоляції трубопроводів та іншого обладнання, що

працює при температурі до 500 °С, а також для створення вогнеперешкоджаючих конструкцій.

Ефективне застосування піноскла для захисту зерносховищ, господарських та житлових приміщень, так як воно не руйнується гризунами та комахами, стійке до руйнування мікроорганізмами.

Особливо добре піноскло підходить для утеплення приміщень з особливими вимогами до температурного та вологостійкого режимів. Численні переваги піноскла дозволяють швидко, якісно і на довгий термін вирішувати численні проблеми теплоізоляції в будь-якому особистому господарстві.

Піноскло – матеріал, що не дає усадки, тобто довготривало зберігає стабільність розмірів. Тривалість його експлуатації практично не обмежена.

Розроблено кілька технологій, що дозволяють створити гнучкі, технологічно прості і дешеві виробництва піноскла з низькою енерго- і матеріаломісткістю, а також забезпечення розширення асортименту і підвищення якості продукції [1]. В якості сировини для таких виробництв можливе використання декількох незалежних джерел, в тому числі і будь-який несортований скляний бій.

Підводячи підсумки, можна зробити висновок, що альтернативи використанню піноскла просто не існує, якщо ми хочемо в майбутньому будувати недороге, безпечне і довговічне житло. Цей матеріал неминуче доведеться використовувати в будівництві якщо не сьогодні, то через рік або два - альтернативи просто немає. І питання стоїть лише так - буде матеріал імпортований або вітчизняний.

РОЗДІЛ 1 ВИРОБНИЦТВО ПІНОСКЛА В СВІТІ ТА В УКРАЇНІ

1.1 Стан виробництва в галузі хімічної технології піноскла

Скляна промисловість є однією з базових галузей економіки України і відіграє важливу роль у формуванні макроекономічних показників окремих регіонів і держави в цілому. Виробництво скла та виробів з нього - велика, ємна галузь, яка постійно розвивається. Попит на скло зростає.

Протягом останніх років виробництво скла має високі, стійкі темпи зростання, які обумовлені підвищенням попиту на склопродукцію. Виробництво піноскла є однією з підгалузей скляної промисловості. І також як і сама галузь є зростаючою і перспективною галуззю виробництва.

Піноскло - легкий (щільністю не більше 200 кг/м^3), пористий матеріал зі скла, що представляє собою затверділу скляну піну. Вперше піноскло було отримано в Радянському Союзі ще в тридцяті роки минулого століття відомим вченим і фахівцем в області скла І.І. Китайгородським [2]. Тоді на території колишнього СРСР працювало чотири заводи з виробництва піноскла. Пізніше цей матеріал (з різних причин) «був забутий». Сьогодні в практиці світового будівництва піноскло широко відоме, більшість вітчизняних проектувальників і будівельників «познайомилися» з цим матеріалом і його застосуванням в останні десятиліття.

В даний час піноскло знайшло різні сфери застосування в будівництві та техніці:

Блоки з піноскла як ізоляційний матеріал

Технічні характеристики ізоляційних блоків: густина - не більше 200 кг/м^3 , діапазон робочих температур - від -260°C до $+485^\circ\text{C}$; теплопровідність - $0,07 \text{ Вт/мК}$; межа міцності при стисканні - не менше $0,7 \text{ МПа}$; водопоглинання - не більше 5% за об'ємом; шумопоглинання - не менше 56 Дб [3-5].

Блок товщиною 120 мм володіє теплоізоляційними властивостями, як цегляна кладка, товщиною 950 мм. Теплоізоляція з піноскла, в порівнянні з іншими матеріалами, більш ефективна і економічна, не вимагає частих ремонтів і термін служби її набагато триваліший. Застосовується для ізоляції теплових агрегатів і ізотермічних ємностей. Використання піноскла в будівництві дозволяє знизити втрати тепла в 2,5-3 рази [4].

Блоки з піноскла як звукоізоляційний матеріал

Дослідження підтвердили, що піноскло володіє високими звукоізоляційними якостями. Воно поглинає в рівній мірі звукові коливання різних частот [5].

Блоки з піноскла як будівельний матеріал

Використання в повній мірі комплексу термо- і звукоізоляційних властивостей при високій міцності, а також можливість зв'язуватися з іншими будівельними матеріалами, такими як: цемент, алебастр, бетон, камінь, цегла, залізо, залізобетон, будівельна кераміка і т.д. [6-11] дозволяють вважати піноскло ефективним будівельним та будівельно-ізоляційним матеріалом не тільки для внутрішніх перегородок, але і для заповнення зовнішніх стін в звичайному, і особливо у висотному будівництві. Застосування піноскла як наповнювача дозволяє різко знизити вагу зовнішніх стін і навантаження на фундамент, а також здешевити будівництво. Піноскло легко піддається механічній обробці. Його можна пиляти, різати, свердлити.

Екологічна безпека піноскла робить його придатним для будь-яких видів будівництва резервуарів і технологічних ліній в харчовій і фармацевтичній промисловості. Головне завдання сьогодення вивести вітчизняне виробництво піноскла на світовий рівень і збільшити експортний потенціал країни.

Наразі в будівельній індустрії країни існує тільки одне промислове виробництво такого ефективного теплоізоляційного матеріалу як піноскло – ООО «НПП Технологія», що знаходиться в Сумській області (м. Шостка). Товариство створене в 2010 році. Продукція цього товариства відома не лише в нашій країні, але й закордоном, і стає з кожним роком все більш популярним на світовому ринку будівництва [12].

Основною перешкодою широкої організації виробництва піноскла є відсутність технологій, які забезпечують отримання дешевого матеріалу з властивостями, що задовольняють сучасні вимоги виконання ізоляційних робіт, а також не достатнє освоєння сировинної бази.

Фізико-технічні властивості піноскла в значній мірі обумовлені способом його виробництва, складом скла і піноутворюючої суміші, природою, кількістю газоутворювача, режимом спінювання і відпалу. Змінюючи ці фактори, можна отримати піноскло з різною об'ємною масою, міцністю, структурою, водопоглинанням, проникністю, теплопровідністю і морозостійкістю[13-14].

Світові лідери виробники піноскла (блочного) та фізико-хімічні характеристики їх продукції

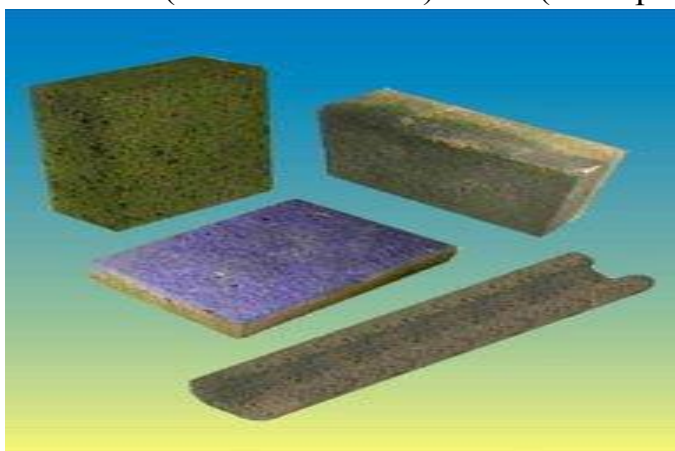
Для наочності наводимо характеристики піноскла однакових розмірів (600мм × 450мм × 300 мм).

- Піноскло (ВАТ "Гомельстекло") Республіка Білорусь (м. Гомель)



<i>Найменування</i>	<i>Показник</i>
Щільність, кг/м ³ , не більше	200
Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К), не більше	0,07
Міцність на стиск, МПа, не менше	0,8-3,0
Міцність при згині, МПа, не менше	0,3-1,0
Водопоглинання, %, не більше	5
Коефіцієнт звукопоглинання, %	15-20
Шумопоглинання, дБ, не менше	56
Діапазон робочих температур, °С	-260 +485

- Піноскло (ЗАТ Пеноситал) Росія (м. Пермь)



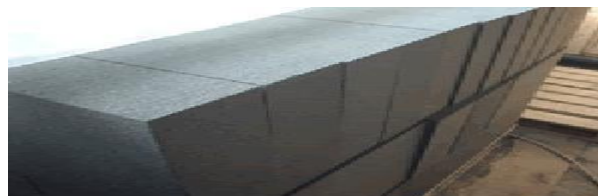
<i>Найменування</i>	<i>Показник</i>
Щільність, кг/м ³ , не більше	220
Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К), не більше	0,045
Міцність на стиск, МПа, не менше	1,5
Міцність при згині, МПа, не менше	0,3
Водопоглинання, %, не більше	10
Коефіцієнт звукопоглинання, %	-
Шумопоглинання, дБ, не менше	-
Діапазон робочих температур, °С	-

- Піноскло Неопорм (ТОВ Компанія РТЕС) Республіка Білорусь (м. Мінськ)



Найменування	Показник
Щільність, кг/м ³ , не більше	180
Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К), не більше	0,05
Міцність на стиск, МПа, не менше	1,5
Міцність при згині, МПа, не менше	0,3
Водопоглинання, %, не більше	більше 1
Коефіцієнт звукопоглинання, %	-
Шумопоглинання, дБ, не менше	-
Діапазон робочих температур, °С	-260 до +486

- Пеностекло НеоТим (Компанія Диел Нио), Китай



Найменування	Показник
Щільність, кг/м ³ , не більше	160
Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К), не більше	0,05
Міцність на стиск, МПа, не менше	2
Міцність при згині, МПа, не менше	0,3
Водопоглинання, %, не більше	1
Коефіцієнт звукопоглинання, %	-
Шумопоглинання, дБ, не менше	-
Діапазон робочих температур, °С	-250 до +500

- Піноскло "ПС" (ТОВ "НВП Технологія") Україна (м. Шостка)



Найменування	Показник
Щільність, кг/м ³ , не більше	130
Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К), не більше	0,048
Міцність на стиск, МПа, не менше	0,5
Міцність при згині, МПа, не менше	0,7
Водопоглинання, %, не більше	0,5
Коефіцієнт звукопоглинання, %	20
Шумопоглинання, дБ, не менше	54
Діапазон робочих температур, °С	-250 до +500

- Піноскло FOAMGLAS® (PITTSBURGH CORNING EUROPE S.A./N.V)
Америка (Штат Пенсильванія, м. Пітсбург)



Найменування	Показник
Щільність, кг/м ³ , не більше	130
Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К), не більше	0,045
Міцність на стиск, МПа, не менше	0,55
Міцність при згині, МПа, не менше	0,9
Водопоглинання, %, не більше	0,5
Коефіцієнт звукопоглинання, %	25
Шумопоглинання, дБ, не менше	60
Діапазон робочих температур, °С	-260 до +430

Розглянувши фізико-механічні показники матеріалів, що виготовляють лідери серед виробників піноскла, можна сказати, що вітчизняний виробник піноскла "ПС" (ТОВ "НВП Технологія") Україна, м. Шостка може з впевненістю конкурувати з світовим лідером FOAMGLAS® (PITTSBURGH CORNING EUROPE S.A./N.V) Америка (Штат Пенсильванія, м. Пітсбург) за своїми фізико-механічними показниками, особливо якщо враховувати вартість вітчизняного аналогу.

1.2 Огляд існуючих технологій та методів виготовлення продукції

Необхідність випуску спіненого скла з підвищеними термо- і вологозахисними властивостями виникає необхідність обрання технологій його виробництва. З цією метою на склозаводах з виробництва листового скла будують технологічну лінію за схемою відомого двостадійного способу виробництва піноскла.

Принципова технологічна схема двостадійного способу виробництва піноскла показана на рис. 1.1.

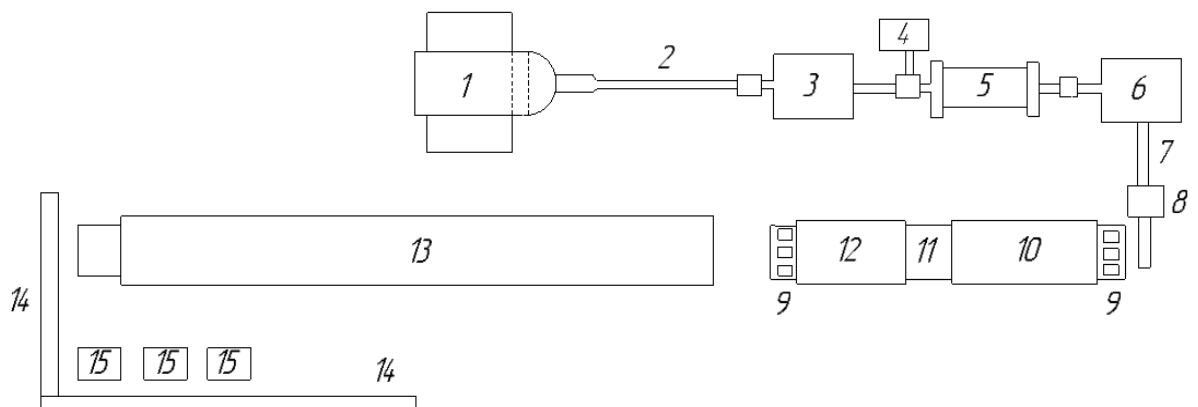


Рис. 1.1. Схема двостадійного способу виробництва піноскла [15]

1 - скловарна піч; 2 - гранулятор скла; 3 - бункер для грануляту; 4 - бункер для газотворювача; 5 - кульовий млин; 6 - бункер для піноутворюючої суміші; 7 - стрічковий транспортер; 8 - витратний бункер суміші; 9 - форми для спінювання; 10-12 - тунельна піч для спінювання з одноступінчастою системою форм (10 - зона спінювання; 11- зона охолодження; 12 -

стабілізації); 13 - конвеєрна піч для відпалу піноскла; 14 - стрічковий транспортер; 15 - верстати для обрізки блоків

Даною схемою передбачено забезпечення виробництва листового скла постійного хімічного складу, застосування в якості газоутворювача антрациту, а в подальшому можливе використання газової сажі, а також вдосконалена конструкція печі. Піч відпалу була подовжена до 40 м в закритій частині, що забезпечує рівномірне охолодження блоків зі швидкістю $0,6-0,8\text{ }^{\circ}\text{C/хв}$ в інтервалі температур $590 \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Як сировину застосовують скло 2Н, яке вариться з суміші піску, соди, сульфату, доломіту, крейди і нефелінового концентрату. Завдяки нефеліновму концентрату повністю вводиться окис алюмінію і частково окиси натрію і калію. За для підтримування в складі скла $0,2 - 0,3\%$ SO_3 вводився сульфат натрію.

Варка здійснюється в печі, що опалюється газом, з поперечним рухом полум'я. Атмосфера в печі має окислювальні властивості, температура варіння $1460 \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Повне освітлення скломаси не досягається. Склomаса після варки тонкими струмінцями потрапляє на рухомий сітчастий транспортер, зрошений водою. Така технологія дозволяє отримати гранулят з невеликим вмістом залишкової вологи, яка має вплив на швидкість помелу скла в кульовому млині. При вологості скла приблизно $0,3 - 0,5\%$ помел його до питомої поверхні $5000-6000\text{ см}^2/\text{г}$ прискорюється на $10 - 15\%$. Спостерігається також позитивний вплив вологи на кінетику спінювання. Такі суміші спінуються при більш низьких температурах, а отримане на виході піноскло володіє поліпшеною комірковою структурою. Це викликано пониженням в'язкості та поверхневого натягу в присутності пари, а також прискоренням газоутворення. Швидке охолодження скломаси зменшує утворення зародків кристалізації, що виникають у разі повільного охолодження [15].

Можливий на виробництво піноскла з листового скла зі складом 6Н потрібне корегування режиму варіння скла та його переробки на гранулят.

Якщо охолодження струменя скла буде прискорене тоді підвищується здатність його до диспергування, це дозволяє підвищити ступінь подрібнення піноутворюючої суміші на 10%. За такою методикою отримують піноскло з більш дрібною і упорядкованою структурою, зростає його міцність і знижується водопоглинання. Дані відомості вказують на необхідність глибшого вивчення листового скла і виявлення ступеня його впливу на зміну важливих для технології фізико-хімічних властивостей, так як вони в подальшому впливають на весь технологічний процес виробництва піноскла. Роботи [16-22] мали на меті визначити закономірності, при тому дослідження проводилися на зразках скла, склад якого не характерний для даної технології.

Дозування газоутворювача та скла проводиться на автоматичних вагах. В якості газоутворювача застосовувався антрацит в кількості 1,5 - 1,7%. Помел здійснюється до питомої поверхні 4500-5000 см²/г [23].

Для спінювання скла застосовуються форми, які складаються з двох частин. Верхня і нижня половини форми однакової глибини виглядають в складеному стані як усічена піраміда. Нижня частина форми має отвір діаметром 230 мм, туди вкладається піддон для полегшення виштовхування блоку. Внутрішній розмір 435×435×120 мм. Максимальні розміри блоків спіненого скла після обрізки 400×400×120 мм [1].

Щоб не допустити прилипання виробу до металу внутрішня поверхня форми змащується каоліно-азбестовою суспензією. Її можна наносити пензлем або за допомогою пульверизатора. Суспензію бажано збагатити різними стабілізаторами, такими як сульфітно-спиртова барда, крохмаль, декстрин та інші, вони крім стабілізуючої дії на суспензію, здійснюють позитивний вплив на підвищення міцності захисного покриття. Величина наважки суміші піноутворювача, яка визначає об'ємну масу піноскла, знаходиться виходячи з внутрішнього обсягу форми.

Після вирівнювання шару піноутворюючої суміші форми закриваються кришками і надходять в піч спінювання, вони рухаються гідравлічним

штовхачем в тунельну піч з інтервалом в 4 хв. Цикл штовхання форм визначається властивостями і складом піноутворюючої суміші, а також розмірами і конструкцією печі. Після надходження форм у піч штовхач повертається у вихідне положення, а вільний візок по шляху обгону потрапляє до розвантажувального кінця печі, де він автоматично встановлюється в заданому положенні для прийому форм з блоками піноскла.

Звільнені форми в розкритому вигляді на цьому ж візку опяняються на зачистці внутрішньої поверхні, нанесення шару захисної суспензії і подальше дозування суміші. Одну технологічну лінію одночасно обслуговують п'ять транспортних візків, які в процесі роботи проходять наступні стадії: підготовка форм і завантаження піноутворюючої суміші; подача форм в піч; приймання форм з печі; подача форм на вивантаження. Візок рухається по вузькоколіїному замкненому циклу навколо печі спінювання.

Тунельна піч спінювання піноскла

Спінювання, охолодження і стабілізація відбувається в тунельній печі, де форми рухаються на жаростійких салазках, що ковзають по жаростійких направляючих.

На рис. 1.2 показаний повздовжній переріз тунельної печі Гомельського склозаводу [15].

Загальна довжина печі спінювання становить 15 м. За довжиною вона розділена на три самостійні, послідовні зони: спінювання 1, охолодження 2 і стабілізації 3, кожна з них має свій певний температурний режим. Зони спінювання і стабілізації виготовлені зі звичайної шамотної кладки, ізолюваної ззовні легковаговою цеглою, зона охолодження має вигляд металевого кожуха. Зони спінювання і стабілізації відокремлені від зони охолодження шамотними шиберами 5, які встановлені над кришками форм на висоті 10-15 мм і цим самим дозволяють більше відокремити зону охолодження. Зони 1 і 3 повністю забезпечені самостійною системою для

спалювання природного газу. Пальники 6 розміщені по обидва боки вздовж печі спінювання в шаховому порядку. Спалювання відбувається в топках 7, розташованих під напрямними 8 для пересування форм. Димові гази печі проходять через пічний простір, омиваючи форми, і відводяться через канали всмоктування 9.

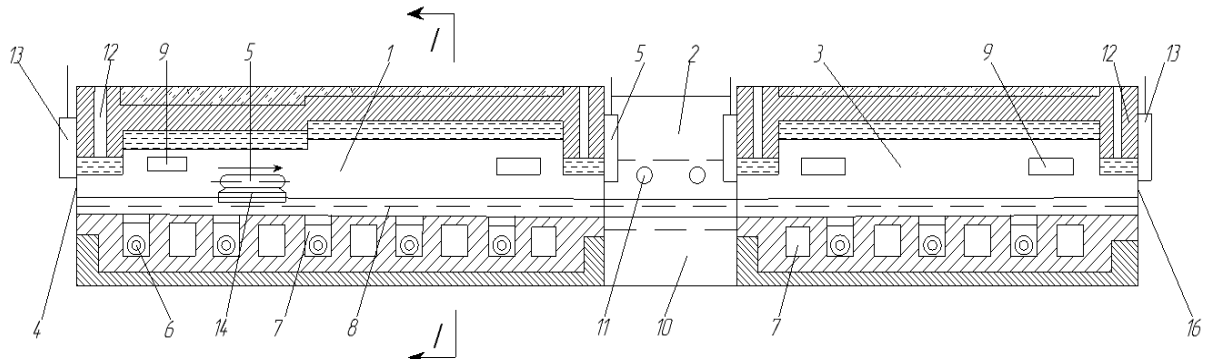


Рис. 1.2. Поздовжній розріз печі спінювання Гомельського склозаводу

1 - зона спінювання; 2 - зона охолодження; 3 - зона стабілізації; 4 - загрузочний отвір печі; 5 - регульовані шибера; 6 - газовий пальник; 7 - топка; 8 - напрямні руху форм; 9 - горизонтальні канали для відсмоктування димових газів; 10 - вентиляційна камера; 11 - вентиляційні отвори в кожусі камери охолодження; 12 - вертикальні канали для димових газів; 13 - шибера; 14 - повзунки для встановлення форм; 15 - форма для спінювання; 16 - розвантажувальний отвір печі [15].

Зони спінювання та стабілізації мають свій самостійний аеродинамічний і температурний режими, які за необхідністю можуть легко змінюватися. Довжина кожної зони розрахована на підставі даних, які були отримані при спінюванні піноскла в камері електричної печі : зона 1 - 10 м; 2 - 1,1 м і 3 - 3,9 м. На рис. 1.3 показані температурні криві виробництва спіненого скла на основі скла 2Н і алюмоборосилікатного.

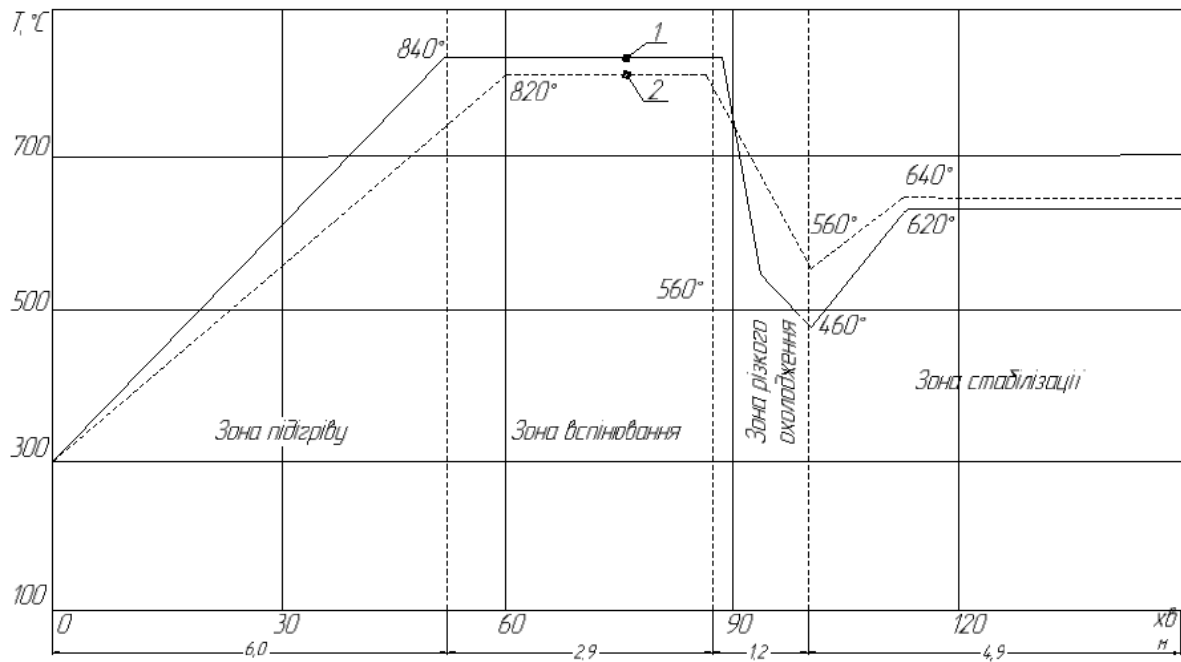


Рис. 1.3. Температурні криві тунельної печі з одноярусним встановленням форм [23]

1 - для піноутворюючої суміші на основі скла 2Н і антрациту;

2 - скла НС-2 і газової сажі.

При циклічності штовхання форм 4 хв. тривалість знаходження їх в кожній зоні відповідно дорівнює 84,8 і 32 хв. З огляду те, що зона 1 включає підігрів суміші до температури початку спінювання суміші і ділянку власне спінювання, загальна тривалість знаходження форм в цій зоні розподіляється на два періоди - підігрів протягом 54 хв. і спінювання 20 хв.

Тобто, загальна тривалість перебування форм в печі спінювання при циклі штовхання 4 хв. становить 124 хв. Продуктивність печі для заданого режиму завантаження форм становить 7,2 тис.м³ спіненого скла в рік. У [1, 15] доведена можливість спінювання скла при скороченні циклу завантаження форм до 3 хв., що дозволило збільшити потужність печі до 9,3 тис.м³ на рік. Одноярусне розташування форм в тунельній печі забезпечує можливість підтримки в ній необхідної ізотермії по ширині каналу.

Можливим є застосування для спінювання форм збільшених розмірів, в яких можна було б спінювати блоки розмірами $500 \times 500 \times 120$ мм, що дозволить при збереженні циклу штовхання 3 хв. збільшити потужність печі спінювання до 14,5 тис.м³ піноскла в рік.

Теплообмін форм при нагріванні

Температурний режим є одним з найважливіших етапів в технології виробництва піноскла, так як в залежності від режиму можна отримати піноскло з широким діапазоном властивостей.

Прогрів суміші піноутворювача в формі до температури спікання відбувається відносно тривалий час. Наприклад, як в роботі [23], ця тривалість становить 70 хв. Маса нагрівається до 690 ° С. За даними [24], тривалість підігріву до тієї ж температури становить приблизно 25 хв., а за даними [25], встановлення форм в піч здійснюється при температурі 760 ° С і через 35 хв. температура сягає 800 °С. В роботі [26] приводить температурну криву, з якої тривалість підігріву суміші до 690 °С становить 3 год. В роботі [27] тривалість нагрівання до 690 ° С становить 15 хв.

Ці приклади наочно ілюструють відсутність єдиної думки про оптимальний режим нагріву суміші до початку спінювання. Тому існує необхідність розглянути вплив швидкості підігріву суміші на кінетику формування поруватої структури і властивостей піноскла.

Суміш піноутворювача через високу дисперсність містить велику кількість повітря, яке може знаходитися в пустотах між частинками скла і газоутворювача. Завдяки цьому вона має малу теплопровідність і підігрів її до температури спікання займає відносно тривалий час. В інтервалі температур спікання спостерігається різке зменшення об'єму суміші, що супроводжується появою тріщин. Усадка починається в місцях максимальних температур, тобто у напрямку від стінок форми, і при підвищенні температури поширюється до центру. При повільному піднятті температури відбувається рівномірне спікання і утворення дрібних, добре

розвинених по всій масі тріщин. В цьому випадку спік являє собою єдиний шматок з більш-менш однорідною структурою. При швидкому підйомі температури, навпаки, спостерігається утворення великих тріщин. В результаті спік розділяється на кілька великих неоднакових за величиною шматків, між якими утворюються великі раковини. На рис. 1.4 [15] показані спіки, отримані з різною швидкістю нагрівання до однакової кінцевої температури.

Спостереження показали, що більш рівномірне спінювання відбувається при повільному нагріванні суміші, і в тих випадках в спіку відсутні великі тріщини. Оскільки спінювання починається при досягненні температур, відповідних розкладанню газоутворювача, до цього моменту піноутворююча суміш повинна бути в піропластичному стані і мати таку в'язкість, при якій могли б стійко утворюватися бульбашки з максимально тонкими стінками. Так як тепло передається з поверхні спіку до центру, то, очевидно, температура поверхневих шарів його в початковий момент структуроутворення вища, ніж в центрі. Тому на поверхні блоку частково вигорає газоутворювач і утворюється щільна склоподібна кірка.

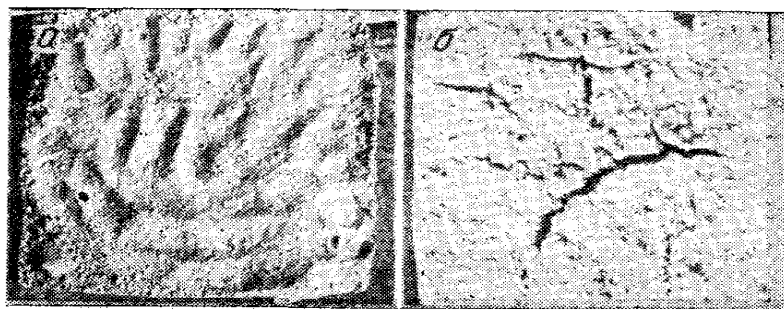


Рис. 1.4. Характер розташування тріщин в спіку піноутворюючої суміші

- а - при нагріванні до температури спінювання зі швидкістю $5\text{ }^{\circ}\text{C/хв.}$;
- б – при нагріванні до температури спінювання зі швидкістю $40\text{ }^{\circ}\text{C/хв}$

Якщо в спіку є великі тріщини, то оскловування відбувається і на поверхні між ними, що надалі знижує якість піноскла. Швидкий нагрів спіків

в інтервалі температур спінювання небажаний в зв'язку з тим, що спінювання, так само як і спікання, рухається в напрямку від більш високих температур, тобто від стінок і днища форм. При наявності в спіку великих тріщин з осклованою поверхнею в результаті бурхливого спінювання можуть утворитися порожнини, які знижують якість піноскла [25].

Рівномірне спінювання досягається в тому випадку, коли градієнт температур між шарами спіку мінімальний як в період спікання суміші, так і в період структуроутворення піноскла. Але повільне нагрівання піноутворюючої суміші також небажане, оскільки це знижує продуктивність печі або вимагає збільшення її довжини. Крім того, тривале термостатування суміші при високих температурах призводить до передчасного вигорання газоутворювача. Звідси випливає, що для отримання рівномірної структури піноскла потрібна висока однорідність спіку і рівномірне, але швидке спінювання.

Найбільш сприятливих умов для швидкого і рівномірного прогріву піноутворюючої суміші можна досягти за рахунок підвищення її теплопровідності. Для цього потрібно ущільнити суміш шляхом вібрації форм після їх завантаження або попередньої грануляції суміші в тарілчастому грануляторі [27]. На думку деяких дослідників [28-32], коефіцієнт теплопровідності гранульованої суміші зростає приблизно в два рази і в залежності від діаметра гранул коливається в межах 0,155-0,230 ккал/(м·год·°C). Це дозволяє скоротити час підігріву суміші до температури початку спінювання на 35-40 %.

Відомі й інші способи підготовки гранульованих сумішей. Всі вони передбачають поліпшення теплофізичних властивостей піноутворюючих сумішей з метою скорочення тривалості їх нагрівання і спінювання, тобто підвищення продуктивності тунельних печей при спрощених температурних режимах їх роботи.

Розробка нових способів підготовки піноутворюючих сумішей і впровадження їх в практику дозволить не тільки підвищити якість піноскла,

але і спростити ряд технологічних операцій на стадії їх підготовки, транспортування, зважування та завантаження в форми. Це дозволить також зменшити запиленість, яка існує у виробництві піноскла.

Спінювання і стабілізація піноскла

Власне спінювання і попереднє йому спікання піноутворюючої суміші визначають якість піропластичної піни. Але якість піноскла в більшій мірі залежить від техніки її стабілізації.

В процесі спінювання важливим є правильний вибір температури максимуму. Високі температури небажані через підвищену витрату тепла і зниження терміну служби форм і тунельних печей. Крім того, при малій в'язкості розплаву утруднена фіксація структури, яка утворилася при спінюванні піни. Низькотемпературне спінювання призводить до зростання водопоглинання піноскла і до вираженої деформації розділювальних стінок. Тому при виборі оптимальної температури спінювання повинні враховуватися, з одного боку, максимальна стійкість піни і можливість швидкої її стабілізації, з іншого - структура піноскла, що характеризується правильною геометрією елементарних комірок та їх самостійністю [33-34].

Своєчасне припинення спінювання і збереження форми готового блоку без видимих і, головним чином, без нерівномірних деформацій відноситься до однієї з найважчих фаз технології виробництва піноскла. Цей процес отримав назву стабілізації.

Успіх правильної і повної стабілізації полягає в тому, щоб процес спінювання можна було припинити в той момент, коли розширення комірок зовнішнього шару блоку вже припинилося, однак блок в цілому знаходиться під дією значного надлишкового тиску з боку його внутрішньої частини. В цей час швидко знижується температура середовища, щоб різко охолодити поверхню блоку до досить низької температури. Поверхнева кірка твердне і як би замикає внутрішню частину, де є ще надлишковий тиск.

Після зниження і вирівнювання температури виділення газів у внутрішніх шарах призупиняється, і блок сформованого піноскла практично

вже знаходиться в стані вирівняного тиску. Якщо процес спінювання не буде припинений вчасно, утвориться піноскло з нерівномірними порами. Крім того, при недостатньому охолодженні форми зовні затверділа кірка може перегріватися за рахунок акумульованого тепла всередині блоку. В результаті усадкових явищ внутрішніх шарів можуть утворитися чашоподібні заглиблення біля дна і частіше під кришкою форми. Нерівномірна усадка блоку відбувається і в тому випадку, коли процес спінювання припиняється пізніше, ніж було потрібно. У цьому випадку відразу ж після незначного зниження температури припиняється виділення газу всередині блоку, в той час як поверхневий шар ще не затвердів. Настає термічне стиснення газів, що несе за собою нерівномірну усадку всього блоку [15].

Незважаючи на те, що питання про правильну стабілізацію піноскла тривалий час вивчається багатьма дослідниками, до теперішнього часу немає єдиних поглядів як у виборі раціонального температурного режиму печі спінювання, так і про найбільш вигідну її конструкцію. У міжнародних патентах [24, 25, 35] суть стабілізації полягає в тому, що між зонами спінювання і власне стабілізації включається спеціальна зона, що не обігрівается, в якій припиняється спінювання блоку. Охолодження його зовнішньої поверхні до температури 400-500 °C відбувається за 12-15 хв. Після різкого охолодження передбачається підігрів форм до температури 620-640 °C для вирівнювання її по масі блоку.

Відповідно до патентів [36-39] охолодження починається в момент, коли спінена маса ще не заповнила цілком форму. При порівняно повільному охолодженні зовнішніх шарів блоку зростання його в обсязі триває всередині до повного заповнення форми. При такому способі стабілізації піноскла виключається можливість утворення западин на поверхні блоків. У всіх випадках після завершення процесу спінювання прагнуть викликати затвердіння поверхні блоку в формі охолодженням до температури, при якій була б виключена можливість термічної усадки. Так як при охолодженні в піносклі виникають тимчасові напруги і блок в цих умовах знаходиться в

критичному стані, в печі спінювання за зоною охолодження знаходиться зона стабілізації, в якій відбувається зняття виниклих при охолодженні напруг і вирівнювання температури по всій товщині блоку.

Правильно стабілізоване піноскло завжди характеризується певною усадкою, вона відбувається внаслідок зниження тиску всередині комірок при охолодженні. Скорочення об'єму відбувається до тих пір, поки не будуть повністю зняті напруги розтягнення між шарами. При цьому блок настільки скорочується, що він повністю відділяється від стінок форми і витяг його в цей момент не представляє труднощів. При подальшому охолодженні блоку в формі в зв'язку з випереджаючим скороченням металу (форм) спостерігається зворотне явище. Піноскло, перебуваючи вже в твердому стані, зменшується в об'ємі пропорційно коефіцієнту об'ємного розширення, який значно менший, ніж у жаростійкого чавуну: відбувається випередження скорочення форми, блок в ній стискається, і витяг його ускладнюється.

Відпал піноскла

Завершальною стадією режиму термообробки піноскла є відпал. Але якщо всі дослідники сходяться на думці, що швидкість відпалу повинна бути мінімальною, то їх оцінка максимально допустимої швидкості охолодження значно розходиться. В роботі [26] автори пропонують величину 0,7-0,8 °C/хв., тоді як в роботі [2] - 0,2-0,3 °C/хв.

Наведені приклади свідчать про те, що питання про швидкість відпалу піноскла вивчене недостатньо і потребує уточнення. Це пояснюється тим, що швидкість відпалу залежить, від багатьох факторів: хімічного складу скла, структури піноскла, характеру його пористості, величини водопоглинання, виду газотворювача, що застосовується, форми і розмірів відпалених виробів, способу їх отримання та ін. Відсутність надійних методів визначення залишкових напружень в піносклі і безліч факторів, що впливають на швидкість відпалу, ускладнюють, хоча б з деяким

наближенням, виявлення впливу режиму відпалу на кінцеві властивості піноскла.

З досвіду роботи підприємств, що випускають піноскло, видно, що стадія відпалу є не менш важливою, ніж процес спінювання. Якщо спінювання піноскла порівняно легко можна регулювати складом піноутворюючої суміші, її властивостями і температурним режимом, то ступінь відпалу виробів контролюється лише тривалістю процесу. Тому до теперішнього часу існують різні думки про тривалість відпалу і про характер температурної кривої цього процесу. Автори роботи [25] вважають, що перепади температур, що з'являються при охолодженні між поверхневими і внутрішніми шарами блоку піноскла, викликають появу напруг того ж виду, які виникають і в щільному блоці. Отже, між способом відпалу піноскла і масивного звичайного скла не існує принципової різниці.

Вважається можливим розрахунок швидкості відпалу вести за рівнянням А. Н. Даувальтера [1] згідно з яким швидкість охолодження пропорційна квадрату половинної товщини блоку, або:

$$h = \frac{k}{a^2} \text{ } ^\circ\text{C/хв.},$$

де a - половинна товщина блоку, мм;

h - максимально допустима швидкість охолодження, $^\circ\text{C} / \text{хв}$;

k - константа, яка визначається експериментально на моделях,

враховує властивості піноскла ($^\circ\text{C} \cdot \text{см}^2$) / хв.

Автор [40] пропонує охолодження піноскла вести з різною швидкістю в залежності від рівня температури. В області температур власного відпалу рекомендується охолоджувати піноскло зі швидкістю 0,5-0,6 $^\circ\text{C} / \text{хв}$, а нижче 400 $^\circ\text{C}$ - по 0,7 $^\circ\text{C} / \text{хв}$. Дані авторів [2] з швидкості охолодження також не узгоджуються з наведеними вище. Можливо вони отримали зразки в лабораторній печі, де був відсутній теплообмін між блоками і газовим середовищем печі, характерний для заводських установок.

На швидкість відпалу виробів зі скла найбільш вагомо впливає величина коефіцієнта термічного розширення (КТР). Для піноскла ця закономірність зберігається. Так, в склі, що має теплове розширення нижче $65 \cdot 10^{-7} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ і спінюється при температурі 875-950 $^\circ\text{C}$, тривалість відпалу блоків товщиною 10 см становить всього 2 години. Скло з високим вмістом B_2O_3 , що вводиться за рахунок R_2O , відпалюється порівняно швидко, так як їх КТР значно менший звичайних лужних стекл. У міру підвищення КТР скла тривалість відпалу піноскла збільшується і для звичайного скла, що застосовуються у виробництві ($\text{КТР} \approx 90 \cdot 10^{-7} \text{ 1/}^\circ\text{C}$), тривалість відпалу блоків товщиною 120 мм становить 12-20 год [2].

Коефіцієнт термічного розширення піноскла в розглянутому інтервалі температур практично не змінюється, а міцність незначно зростає. Однак по мірі зниження температури зменшуються коефіцієнт теплопровідності піноскла і в кілька разів швидше температуропровідність, що, очевидно, пов'язано з ослабленням радіаційного теплообміну і конвекції газів всередині комірок. У зв'язку з цим навіть при рівномірному охолодженні піноскла температурний градієнт між окремими шарами виробу (блоку) буде збільшуватися в міру зниження температури матеріалу, в результаті чого напруження в піносклі зростатимуть. Якщо значення їх перевищать допустиму для піноскла величину, яка визначається його міцністю, то відбудеться руйнування виробу. Тому в загальному вигляді температурна крива відпалу піноскла повинна будуватися з урахуванням зниження теплофізичних властивостей піноскла, тобто швидкість охолодження повинна зменшуватися по мірі зниження температури [15].

Залежно від структури піноскла (величина пор, характер їх розподілу, наявність сполучених каналів) може змінюватися конвективний теплообмін усередині блоку. Питома частка конвективної складової в загальному теплообміні зростає по мірі збільшення розміру елементарних комірок і наявності в піносклі сполучених пор. Це сприяє підвищенню температуропровідності піноскла і дозволяє вести відпал його з більшою

швидкістю. Прикладом може служити піноскло, отримане на карбонатних газоутворювачах, яке цілком задовільно відпалюється при зниженні температури зі швидкістю $1,8^{\circ}\text{C}/\text{хв}$. Для піноскла на вуглецевих газоутворювачах зазначена швидкість охолодження, неприпустима.

З викладеного випливає, що при розрахунку кривої відпалу піноскла повинні враховуватися головним чином температуропровідність, міцність і коефіцієнт термічного розширення піноскла. Значення вказаних величин при різних температурах відпалу необхідно визначати на зразках піноскла, випиляних з блоків із середніми якісними характеристиками. Для кожного складу скла і виду піноскла крива відпалу розраховується окремо.

На підставі результатів визначення в інтервалі температур відпалу ($100\text{-}500^{\circ}\text{C}$) значень теплопровідності, температуропровідності, міцності і КТР піноскла, спіненого з суміші скла 2Н, 6Н і антрациту, була розрахована швидкість відпалу блоків піноскла завтовшки 120 мм при різних значеннях температури. Отримані результати підтвердили припущення про те, що по мірі зниження температури в печі відпалу швидкість охолодження повинна також знижуватися. Так, для блоків зі скла 2Н і антрациту допустима швидкість охолодження при 500°C становить $1,63^{\circ}\text{C} /$, при 100°C - $0,8^{\circ}\text{C} / \text{хв}$. Для блоків зі скла 6Н і антрациту - відповідно 1,73 і $0,85^{\circ}\text{C} / \text{хв}$. Швидкість відпалу блоків піноскла, отриманого з застосуванням газової сажі, що характеризується дрібною замкнутою структурою з середньою величиною осередків 0,5-1,5 мм, знижується в порівнянні з блоками зі скла 6Н і антрациту на 30-40% [15].

Крім того, при відпалі виробів з піноскла необхідно враховувати характер теплообміну в печі відпалу. Обов'язковою умовою має бути підтримка в печі необхідної ізотермії. Градієнт температур в межах розмірів відпалених виробів не повинен перевищувати $5\text{-}10^{\circ}\text{C}$. Перевищення цієї величини, особливо в вертикальному напрямку, знижує якість відпалу піноскла.

При відпалі виробів великих розмірів, наприклад необпиляних блоків піноскла, рекомендується застосовувати конвективні печі відпалу з примусовою вертикально спрямованої рециркуляцією теплоносія. Тривалість відпалу піноскла в конвективних печах у порівнянні зі звичайними конвейєрними агрегатами скорочується за рахунок активізації теплообміну всередині каналу відпалу.

Організація виробництва піноскла на Гомельському склозаводі за описаною вище схемою двостадійного способу дала можливість отримати зі скла 2Н і антрациту піноскло з об'ємною масою 160-190 кг/м³, міцністю 10-12 кг/см² і об'ємним водопоглинанням 2-3%. Піноскло, отримане з стекол 2Н, боросилікатного і газової сажі, мало об'ємну масу 140-160 кг/м³, міцність 11-20 кг/см² і водопоглинання 0,3-1,0% [34].

В технологічну лінію, освоєну на Гомельському склозаводі входять тунельна піч з однаюрсною садкою форм і конвеєрна піч відпалу. Тривала експлуатація нової лінії підтвердила доцільність переходу існуючої одностадійної технології на двостадійний спосіб виробництва піноскла.

РОЗДІЛ 2. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

2.1 Вибір та обґрунтування точки будівництва

Одним з головних факторів вибору місця забудови є наближеність до родовищ основної сировини, в нашому випадку це пісок. Обираємо місце забудови, яке розташовано біля Білокриницького родовища піску. Мною було обрано околицю смт. Біла криниця, Радомишльського району, Житомирської області. Щоб правильно обрати місце будівництва звертаємося до рози вітрів для Радомишльського району. З огляду на напрямки вітрів, мною було обрано півн.-східну околицю смт. Біла криниця.

За допомогою Держгеокадастру перевіряємо чи не зайнята земля під забудову сільськогосподарськими угіддями, рекреаційними зонами, лісами та чи заболоченою є місцевість.

Обравши потрібну ділянку землі перевіряємо чи площа задовольняє вимоги скловарного виробництва в даному випадку задовольняє і складає 4,5 га.

Наступним фактором є наявність добре розвиненої транспортної розв'язки та бажана наявність залізничної гілки. На обраній мною території відсутня близькість залізничною гілки, але поблизу в південному напрямку (600 м) знаходиться траса державного значення Т1005.

Далі перевіряємо ділянку на наближеність до водних ресурсів. На відстані 500 м на північ знаходиться повноводна річка Тетерів.

Обрана мною ділянка віддалена від смт. Біла криниця на 8 кілометрів, але з східної сторони знаходиться невелике селище. Так як робочої сили буде не достатньо, мною вирішено збудувати на території підприємства гуртожиток.

Ринок збуту виготовленої продукції досить великий, так як підприємство знаходиться на кордоні Житомирської та Київської областей.

Крім того територія підприємства повинна містити наступні будівлі:

- машино-ванний цех;
- цех з підготовки шихти;
- склад сировинних матеріалів (відкритий та закритий);
- склад готової продукції з рампою;
- адміністративний корпус;
- промисловий майданчик;
- допоміжні будівлі (електропідстанція, газорозподільний пункт, водоочисні споруди).

На даній ділянці є всі необхідні комунікації, серед яких електро-, газо-, водопостачання та каналізація.

Також слід знати які споруди не можуть бути розташовані одна біля одної: електропідстанція-газорозподільний пункт, електропідстанція головний корпус.

Організація розташування основних будівель

Біля головної прохідної, у східній частині ділянки, розміщено адміністративний корпус. Навпроти нього розташований машинований цех, який конструкційно об'єднано із цехом приготування шихти, що в свою чергу об'єднано із складом сировинних матеріалів і це полегшує і робить дешевшим транспортування сировини по території заводу.

На західній частині підприємства знаходиться навал склобою, який поступає на ділянку по переробці склобою, яка заходиться поряд з основним виробничим цехом.

З сторони річки, розміщено ділянку водоочистки, біля якої розташована друга прохідна.

Північну частину ділянки займає склад готової продукції, який обладнаний рампою. Поблизу машинованого цеху розташований склад вогнетривів. Електропідстанція і газорозподільний пункт розведені по території, і знаходяться так, щоб можна було легко завести комунікації з населеного пункту.

Розведення комунікацій

Підприємство з виробництва скла є споживачем великої кількості електроенергії, природного газу і води.

Головні витрати газу йдуть для функціонування тепло-технологічного обладнання, такого як скловарна піч, сушильний барабан та ін. Також газ споживається на побутові потреби, наприклад для столової.

Електроенергія необхідна у цехах для забезпечення постійної роботи агрегатів, що працюють від неї, а також для освітлення усіх будівель та обладнання складів сигналізацією.

Необхідною умовою є розташування газороздільного пункту та електропідстанції на різних околицях території заводу. Перетин газопроводу та ліній електропередач є недопустимим.

Водні ресурси необхідні для багатьох технологічних операцій і для побутових потреб, тому необхідно підводити лінії водопостачання і водовідведення до цехів і адміністративного корпусу. Важливо робити водозабір вище по течії річки, а водоскид – нижче.

2.2 Асортимент та вимоги стандартів



Цільовий продукт – блок піноскла розміром 500×500, та товщиною 120 мм. Продукція має відповідати ГОСТ 33676-2015 «Матеріали і вироби з піноскла теплоізоляційні для будівель і споруд. Класифікація. Терміни та визначення». В таблиці 2.1 наведені основні фізико-механічні характеристики теплоізоляційного піноскла.

Таблиця 2.1 – Фізико-механічні показники теплоізоляційного піноскла

Фізико-механічний показник	Значення
Густина ГОСТ 33676-2015	115-145 кг/м ³
Межі міцності при стисненні	≥ 0,7 МПа
Теплопровідність, Вт/(мК) За температури (20±5) °С	≤0,050 Вт/(мК)
Водопоглинання	Не більше 5%
Горючість	Не горючий
Паропроникність	Паронепроникний

Види піноскла поділяються за певними ознаками (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Види піноскла

Вид	Вигляд	Опис
I сорт		Допускаються світлі вкраплення, загальною площею не більше 10% на поверхні блоку. I наскрізні раковини, діаметром до 20 мм, не більше 10 одиниць на одній грані.
II сорт		Допускаються світлі вкраплення, загальною площею не більше 30% на поверхні блоку. I наскрізні раковини, діаметром до 40 мм, не більше 20 одиниць на одній грані.
Паропроникне		Блоки більш світлого кольору ніж I та II сорту, паропроникні, решта фізико-механічних показників ідентичні I та II сорту піноскла. Застосовується в конструкціях, де необхідно або допускається паропроникний матеріал.

2.3 Характеристика сировини, допоміжних матеріалів, енергетичних носіїв

Для виробництва піноскла використовують скломасу, зварену з наступних вихідних матеріалів: кварцового піску, польового шпату, крейди, доломіту, соди та сульфату натрію.

Сировиною для виробництва піноскла є шихта з грануляту 60 мас. %, 40% вторинного склобою і 0,3% газоутворювача технічного вуглецю (у вигляді антрациту, коксу).

Хімічний склад скла для варіння грануляту представлений оксидами, %: SiO_2 - 72,1; Al_2O_3 - 2,00; CaO - 6,6; MgO - 4,0; Na_2O - 14,80; SO_3 - 0,5.

Для забезпечення заданого хімічного складу використовують такі сировинні матеріали:

1) кварцовий пісок (SiO_2) - головний склоформуючий оксид. Кремнезем підвищує в'язкість скломаси, покращує механічні та хімічні характеристики, підвищує тугоплавкість скла і ускладнює його гомогенізацію, зменшує показник заломлення та щільність [41].

Головна вимога до пісків - максимальний вміст діоксиду кремнію і мінімальний вміст фарбуючих домішок. Шкідливими домішками є перш за все сполуки заліза і хрому, що надають жовтувато-зеленого кольору виробу.

2) сода кальцинована (Na_2CO_3) – служить для введення до складу скла оксиду натрію (Na_2O), що відіграє роль плавня в скловарінні, знижуючи тим самим температуру варіння скла, знижує в'язкість скломаси, зменшує схильність до кристалізації.

3) сульфат натрію (Na_2SO_4) – так само як і сода, служить для введення оксиду натрію.

4) крейда (CaCO_3) – служить для введення до складу скла оксиду кальцію (CaO), який знижує температуру плавлення і в'язкість скломаси, покращує механічні та хімічні властивості скла, але підсилює схильність до кристалізації, підвищує щільність.

5) доломіт ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$) – вводить до складу матеріалу MgO і CaO . Оксид магнію знижує температуру плавлення і схильність до кристалізації, підвищує поверхневий натяг, зменшує тривалість провару скломаси. Знижує стійкість скла до дії води.

6) польовошпатний матеріал ($\text{R}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$) - для введення до складу скла оксиду алюмінію (Al_2O_3).

7) газоутворювач технічний вуглець (у вигляді сажі, вугілля).

Склобій повинен відповідати постійному хімічному складу з мінімальним вмістом домішок.

Вимоги до хімічного складу сировинних матеріалів пред'являються згідно з відповідними нормативними документами і наведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Характеристика сировинних матеріалів

Найменування матеріалу	ГОСТ, ТУ	Характеристика матеріалу, склад оксидів
Кварцовий пісок	ДСТУ Б В.2.7 – 157:2011[42] Марка ВС–030–8	SiO_2 не менше 99,0 % Fe_2O_3 не більше 0,06 % Al_2O_3 не менше 0,1 % CaO не більше 0,5 %
Сода кальцинована	ГОСТ 5100–85[43] Марка ОКП21 311020 Вищий сорт	Na_2O –не менше 58,0%,
Натрій сірко–кислий технічний	ГОСТ 6318–77[44] Марка А Вищий сорт	Na_2O –не менше 43,4%,
Крейда мілкогранульована	ТУ 21 БССР 296–89 [45] Вищий сорт	CaCO_3 не менше 54,3 %.
Доломіт	ГОСТ 23673.0–79 [46] Марка ДМ 2,0–0,10	MgO –20,5% CaO –29,5% SiO_2 –3,5% Al_2O_3 –1,6%

В даній роботі для виробництва піноскла використовували відходи виробництва листового скла.

На виробництві використовується мазутне паливо з теплотворною спроможністю $Q_{\text{нр}} = 40000 \text{ кДж/кг}$.

2.4 Обґрунтування вибору технологічної схеми та способу виробництва

У промисловому масштабі в даний час піноскло виробляється лише порошковим методом. При цьому суміш тонко подрібненого скла та піноутворювача нагрівають у вогнетривких, зазвичай металевих формах до спікання при температурі біля $600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (двостадійний спосіб виробництва піноскла, рис. 2.1). Блоки відпалюють, розпилюють та шліфують до точних розмірів.

Технологію виробництва піноскла, можна розділити на чотири виробничих етапи:

1. Підготовка основного скла.
2. Приготування піноутворюючої суміші.
3. Спінювання та відпал.
4. Обробка та упаковка.

Піноскло з низьким водопоглинанням в наш час виробляється в промислових масштабах виключно з використанням вуглецевих піноутворювачів. Використовується як одностадійний так і двостадійний спосіб виробництва піноскла.

Обидва способи мають свої переваги та недоліки. Одностадійний спосіб безперечно є більш простим з точки зору самого виробництва та обладнання; форми в даному випадку внаслідок їх більш повільного нагрівання і охолодження мають більш довготривалий час експлуатації. Однак необхідна кількість форм для однієї садки внаслідок довготривалого відпалу піноскла набагато більша, ніж при двостадійному способі виробництва. Так як умови спінювання і відпалу піноскла мають дуже велику відмінність при використанні однієї печі, то потрібно обрати компромісне

рішення, яке задовільнить обидва процеси, хоча оптимальних умов не вдається досягти ні для однієї з них. В протилежність цьому двостадійний спосіб виробництва дозволяє розділити процес спінювання та відпалу та використати для них дійсно оптимальні умови виробництва.

Двостадійний спосіб має такі переваги:

1. мінімальний час спінювання;
2. досконале регулювання процесу спінювання в самостійній добре керованій печі, включаючи спікання піноутворюючої суміші та стабілізацію спінених блоків;
3. досконале управління процесом відпалу через відпал блоків без форм в спеціально сконструйованій печі відпалу з рівномірним відводом тепла від поверхні блоків;
4. повне використання простору печі відпал;
5. мінімальна кількість форм, які після закінчення процесу спінювання вертаються в виробництво, не проходячи довгого циклу відпалу з піносклом;

У відповідності до сучасного стану техніки двостадійним способом може бути виготовлено дійсно більш якісне, ніж одностадійним, піноскло [47].

РОЗДІЛ 3 ТЕОРІЯ, ТЕХНІКА І МЕТОДИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Виготовлення експериментальних зразків

Шихтою при виготовленні експериментальних зразків була ретельно подрібнена суміш порошків скла (листового) і антрациту. Кількість спінювача у шихті - 1,8%.

Маса порошку скла дорівнювала 40 г. Об'єм наважки становив 35 см^3 (після струшування). Насипна маса суміші порошків скла (листового) і антрациту – $1,14 \text{ г/см}^3$.

Спінювання проводилося в сталевих формах (кубічних) (рис. 3.1).

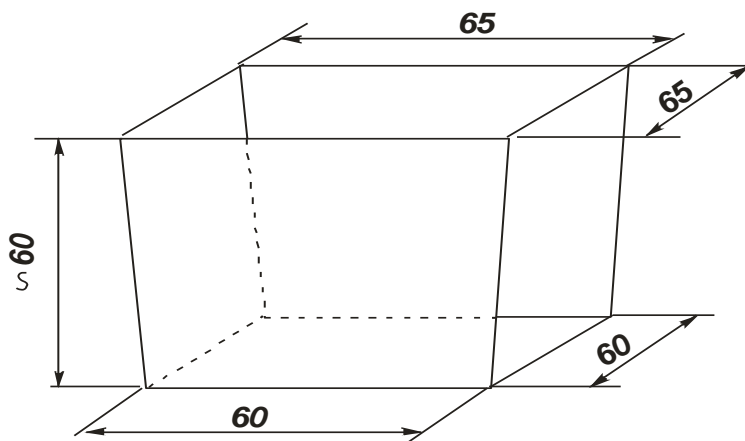


Рис. 3.1. Форма для виготовлення піноскла

Форма виготовлена з сталі. Для покращення вилучення зразків форма була виконана у вигляді піраміди (усіченої). Розмір форми: основа - $60 \times 60 \text{ мм}$; у верхній частині $65 \times 65 \text{ мм}$. Висота форми 60 мм.

Для зменшення вигорання антрациту форма закривалася кришкою. Товщина стінок – 1 мм. Для запобігання налипання до металевих поверхонь форми, форма змащувалась каоліновою суспензією.

Шихта засипалася в форму, після легкого струшування вирівнювався шар шихти. Закрита форма поміщалася в муфельну піч. Піч була виведена на температурний режим.

Підтримка необхідної температури здійснювалося позиційним автоматичним регулятором.

При виході печі на режим температура не залишається постійною.

Експеримент виконувався при трьох основних температурах: 840 °С, 850 °С, 860 °С. При режимі, що виявився найкращім, мінімальна температура становила 840 °С, максимальна – 867 °С. Середньоінтегральна температура становить 885 °С. Тривалість роботи муфельної печі в режимі нагрівання – 50 с, у режимі охолодження – 80 с. У момент загрузки форми в піч, форма встигає охолонути до температури приблизно 600 °С. Встановлення заданого температурного режиму відбувається через 3 хвилини. Температурний режим печі на початковій стадії термообробки наведений на рис. 3.2.

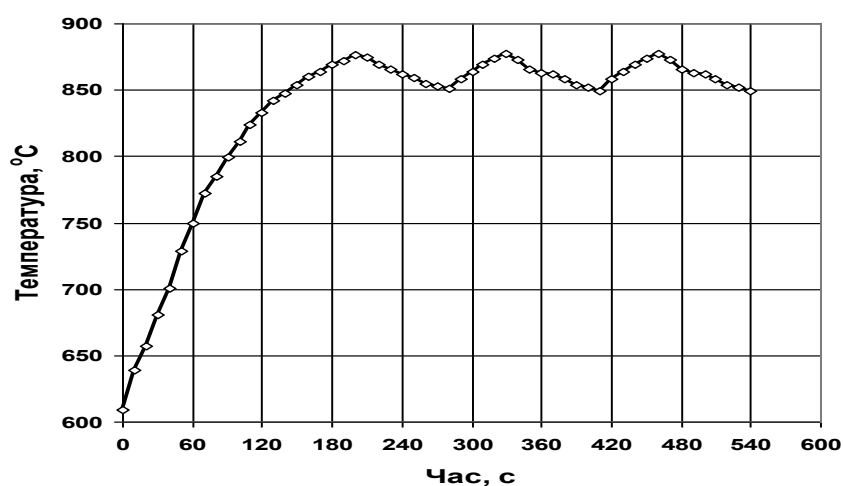


Рис. 3.2. Температурний режим печі

3.2 Режим спінювання модельних зразків

Температура спінювання, визначена фізико-хімічними методами (ДТА, ТГ), не відображає реальні параметри, які повинні бути прийняті до уваги при виготовленні модельних зразків. Визначається масштабний просторово-тривалісний фактор.

За для визначення режиму спінювання було проведено наступний експеримент. Форма наповнювалася наважкою шихти (40 г), витримувалась в

печі, нагрітій до 840 °С, 850 °С і 860 °С. Тривалості витримки відповідно становили: 5, 10, 15, 20, 25 і 30 хвилин.

Після завершення першої половини тривалості спінювання форма була перевернена на 180° для запобігання асиметрії. Бік форми, що був ближче до стінки печі, гріється найсильніше. В момент перевертання форми зніметься кришка, що може призвести до вигорання антрациту.

Після закінчення другої частини випалу форма виймається з печі, трохи остигає для стабілізації піни, і потім поміщається в піч відпалу.

Відпал відігравав другорядну роль. Він здійснюється для того, щоб одержати можливість вилучення зразка з форми без руйнування зразка.

Відпал здійснювався в ході охолодження печі, розігрітої до температури 550- 600 °С.

Після остигання форми зразок виймається шляхом підпилки граней ножівковим полотном. Потім зразок розпилювався.

З результатів досліджень видно, що через 5 хвилин спостерігається термічна усадка шихти з утворенням моноліту. Починаючи з 10-ї хвилини, відбувається спінювання, що розвивається після 15-ї хвилини. Потім темп вповільнюється. Отже, до 30-ї хвилини висота зразка досягає свого максимального значення. Подальший випал не є доречним.

Отримані за такою методикою зразки випробовуються.

3.3 Визначення пористості зразків

Пористість обумовлює зміну деяких фізико-механічних властивостей, так і появу нових (здатності сорбувати рідину, пропускати газу й рідини та ін.).

У залежності від форми й ступеня зв'язності каналів розрізняють відкриту, яка зумовлює проникність матеріалів, і замкнену пористість. З кількісної точки зору пористість є відносною частиною об'єму матеріалів, зайнятою порами.

Відкрита пористість збільшує хімічну активність матеріалів, знижує їхню стійкість і жароміцність тому що в реакціях бере участь вся поверхня відкритих пор усередині матеріалу. Внутрішня поверхня матеріалів (оксидних), пов'язана з наявністю відкритої пористості, що дає можливість застосовувати їх в якості сорбентів й носіїв каталізаторів. В виробах, що одержані литтям, пори виникають в процесі кристалізації. Така пористість незначна і такі вироби до «пористих» не відносять.

Піноматеріали – це матеріали з пористою структурою. Різняться невеликими об'ємною масою й теплопровідністю. В піноматеріалах є великі макропори (від 1 до 3-5 мм), що розрізняються візуально, а мікропори видимі лише під мікроскопом. Вироби з макропористою структурою обов'язково містять мікропори в стінках, що розділяють великі (замкнуті й сполучені) пори [27].

Більша частина дрібних і замкнутих пор підвищує міцність, теплозахисні й звукоізоляційні властивості виробів. Загальна пористість складає 30 - 98%.

Істинна пористість розраховується на підставі визначення об'ємної маси за формулою

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (3.1)$$

де m - маса зразка;

V - об'єм зразка.

Розміри зразків визначався за допомогою двох методів, в залежності від можливостей одержати зразок різної конфігурації. Якщо казати про зразки неправильної конфігурації то їх об'єм визначався гідростатичним методом (витиснення з посудини).

Істинна пористість:

$$П = \frac{\rho_{cm} - \rho}{\rho_{cm}} \cdot 100, \quad (3.2)$$

де ρ_{cm} - густина матричного скла, приймалася як значення 2,5 г/см³.

3.4 Визначення водопоглинання

Водопоглинання має вплив на ряд важливих властивостей і особливо на теплопровідність. При виготовленні ізоляції в умовах підвищеної вологості навколишнього середовища при перепадах температур величина водопоглинання має важливе значення, в цьому випадку використовують вологозахисне піноскло з упорядкованою та замкненою структурою.

Для того, щоб визначити водопоглинання піноскла використовують різні методи. Одна з них, за якою зразок піноскла розміром 5×5×5 см витримується під водою при кімнатній температурі протягом 24 годин. Піноскло, яке використовується для теплоізоляції при позитивних температурах, має деяке відхилення від істинної величини водопоглинання що не має вирішального значення.

Розрахунок водопоглинання:

$$W = \frac{G_2 - G_1}{V} \cdot 100, \quad (3.3)$$

де W — значення водопоглинення, %;

G_2 — маса зразка після витримки у воді, г;

G_1 — маса сухого – зразка, г;

V — об'єм зразка, см³.

Користуються і відомим методом кип'ятіння, що дозволяє досягати надійних результатів, як і при застосуванні вакуумного методу. В методі кип'ятіння застосовуються теж зразки розмірами 5×5×5 см, у яких всі грані обпилені. Зважування проводиться до 0,1 г, визначення лінійних розмірів — до 0,1 мм. Зразки поміщали у посудину для кип'ятіння на дно, віддалене на 20 мм від дна посудини. Проміжок між зразками складав не менш 10 мм. Потім зверху була накладена друга сітка, що навантажувалася з таким розрахунком, щоб при кипінні зразки не спливали. Посуд наповнювали холодною водою на 30 мм вище площини випробуваних зразків і нагрівали до кипіння протягом 2 год. Три години кип'ятіння при заданому рівні води

зразки було охолоджено в нормальних умовах протягом 24 год. Охолоджені зразки виймали з посудини, висушували серветкою і зважували. Об'ємне водопоглинання розраховували за формулою 3.3.

Дана формула не враховує характер розподілу у зразку, а також не дозволяє визначити, частину від загальної кількості пор заповнену водою. При незначному водопоглинанні вибір методики, якою воно визначається, не суттєве.

Визначення водопоглинання ще не говорить про стійкість до дії води. Експлуатація піноскла при високій вологості утрудняє вибір методики випробувань, що близько відповідала б реальним. В зв'язку із цим потрібне тривале витримування зразків піноскла під водою. Цей метод не дає відповіді на поставлене питання, тому що умови випробувань значно жорсткіші, ніж потрібно.

3.5 Визначення ударної в'язкості

Ударна в'язкість – це здатність матеріалів поглинати механічну енергію в процесі деформації та руйнування під дією ударного навантаження. Метод полягає в визначенні енергії, яка витрачається на руйнування зразка, що лежить на опорах, при ударі маятникового копра.

Крихкість – це властивість твердих тіл руйнуватися під дією напруг без помітної пластичної деформації. Крихкість характеризує нездатність до релаксації напруг, які виникають у ньому при деформації виробів. По мірі зростання зовнішніх зусиль внутрішні напруження ростуть і досягають межі міцності, після чого матеріал руйнується. Крихке руйнування є найнебезпечнішим в порівнянні з іншими видами руйнувань, тому що воно характеризується високою швидкістю розвитку та відбувається при відносно невеликій деформації, що передуює руйнуванню.

У загальному випадку матеріал крихкий чи ні залежить від співвідношення між тривалістю дії прикладеної зовнішньої сили (удару) і швидкістю релаксації виникаючих напруг. Скло має крихкість при значеннях в'язкості вище $10^{12,3}$ Па·с і температурах нижче T_g .

Мірою крихкості є опір удару – питома ударна в'язкість a_n , кН/м, позначена як робота зламу A_n , віднесена до площі поперечного перерізу зразка S , тобто $a_n = A_n/S$. Для силікатних стекол в'язкість може змінюватися в межах від 1,5 до 2 кН/м. Склад скла впливає на ударну в'язкість. Введення MgO , B_2O_3 (до 15 %), Al_2O_3 , ZrO_2 , SiO_2 в склад натрієво-кальцієво-силікатних стекол збільшує ударну в'язкість на 5-20 %.

При випробуваннях на ударну в'язкість найбільше поширення одержали маятникові копри. У даній роботі випробування проводили маятниковим копром (рис. 3. 3). Максимальна енергія маятника 4 кДж.

Основною частиною копра є масивний маятник, що гойдається на осі. У піднятому положенні маятник має запас енергії (залежно від висоти підйому). При падінні проходячи через вертикальне положення маятник вдаряє по зразку і руйнує його, на це витрачається частина енергії маятника. Частина енергії, що залишилася, витрачається на підняття маятника після удару. Швидкість руху до моменту удару повинна бути в межах 4-7 м/с, що відповідає швидкості деформації зразків. Знаючи висоту підйому до й після удару і його масу, можна визначити роботу, витрачену на руйнування зразка. На копрі робота визначається автоматично. В такий спосіб ми автоматично отримуємо різницю енергій маятника до і після удару, це є робота витрачена на руйнування зразка. Для обчислення ударної в'язкості витрачену при випробуванні роботу необхідно розділити на площу поперечного перерізу зразка. Для проведення таких випробувань використовують копер зі змінними маятниками (запас потенційної енергії від 1 до 4 Дж).

Перед випробуваннями потрібно провести заміри штангенциркулем з точністю до 0,1 мм ширину й товщину зразків. Для випробування потрібно звести маятник, перевірити положення і встановити зразок на опори копра. Коли проводиться перевірка установки шкали і установки зразка на опорах маятник обов'язково повинен бути закріплений, щоб уникнути випадкового його падіння. При роботі на копрі потрібно користуватися огороженням та працювати в окулярах.

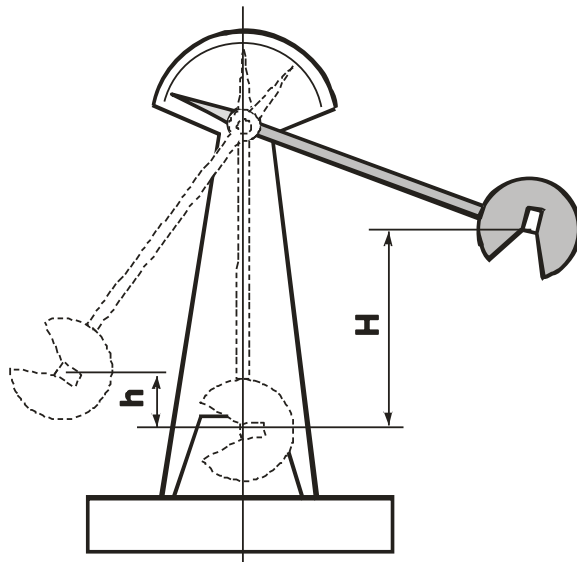


Рис. 3.3. Маятниковий копер

Випробування ударної в'язкості проводять при:

- температурі $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$;
- відносної вологості повітря від 40 до 70 %.

Маятник повинен розташовуватися між опорами з відхиленням не більше 0,5 мм від центра.

Радіус ударної крайки молота $(2,0 \pm 0,5)$ мм. Кут підйому маятника на 160° .

Кут між поверхнею зразка та ударною крайкою $(30,0 \pm 1,0)^\circ$.

Відстань між опорами, на які поміщають зразок, повинна бути (100 ± 1) мм.

Для випробувань відбирались не менше 10 зразків, що не мають зовнішніх вад, вирізаних з готових виробів або виготовлених за тією ж технологією.

Для випробувань використовували зразки наступних розмірів: довжина $(120,0 \pm 1,0)$ мм, ширина $(15,0 \pm 0,5)$ мм, товщина $(6,0 \pm 0,3)$ мм, при цьому на місці нанесення удару різнотовщинність зразка повинна бути не більше 0,1 мм і розкид повинен бути не більше 0,1 мм.

3.6 Визначення міцності на згин

Зразок поміщали на опори таким чином, щоб бойок маятника розташовувався по центру зразка. Похибка установки в центрі зразка стосовно бійка маятника не повинна перевищувати 0,5 мм. Удар наносили по площині зразка.

При випробуваннях визначали енергію, витрачену на руйнування зразка. Якщо зразок був зруйнований, результат записували до протоколу. Якщо зразок не був зруйнований або відпала частина (кут), випробування проводили зі збільшенням енергії удару.

3.7 Проведення випробувань

При випробуванні скла на згин використовують зразки довжиною 75—100 мм у вигляді пластин шириною 15—20 мм, товщиною 2—3 мм. Випробуванню піддавались не менше 10 зразків скла (рис. 3.4).

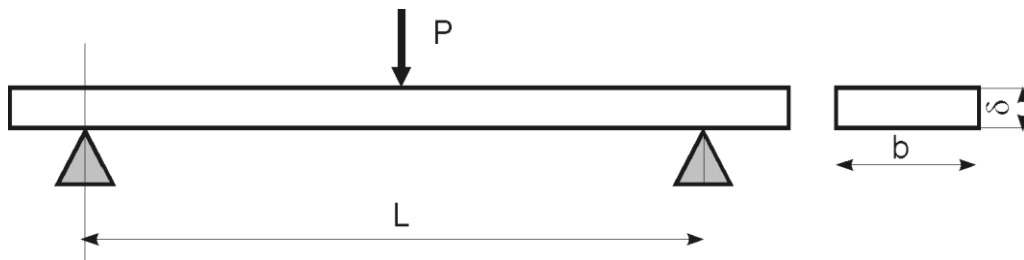


Рис. 3.4. Схема випробування скла на межу міцності на згин

Точність не перевищує 15-20%.

Межу міцності на згин $\sigma_{изг}$ розраховували за формулою:

$$\sigma_{изг} = \frac{3P \cdot L}{2 \cdot b \cdot \sigma^2}, \text{ Па (МПа)} \quad (3.5)$$

де P – руйнівне навантаження, Н;

L – відстань між опорами, м;

b – ширина зразка, м;

σ - товщина зразка, м.

Виконували 10 випробувань і визначали середнє значення.

3.8 Обробка результатів випробувань

Ударну в'язкість X , кДж/см² кожного зразка обчислювали за формулою

$$X = \frac{A}{b \cdot h} \quad , \quad (3.4)$$

де A — енергія, витрачена на руйнування зразка, Дж;

b — ширина зразка, см;

h — товщина зразка, см.

За результат випробувань приймали середнє арифметичне ударної в'язкості всіх випробуваних зразків.

РОЗДІЛ 4 ВИГОТОВЛЕННЯ ПІНОСКЛА

4.1 Дослідження шихти ДТА методом

В роботі використовували газотворювачі, що містять вуглець: такі як антрацит і кокс. Газотворювачі антрацит та кокс використовують при одержанні теплоізоляційного (із закритими порами) піноскла. Окиснення вуглецю при термообробці шихти піноскла призводить до утворення двоокису вуглецю (CO_2), або і окису вуглецю (CO), які спінюють скломасу, що призводить до одержання пінистої (коміркової) структури. Щоб визначити температурні інтервали протікання даних процесів було проведено диференційний термічний аналіз, результати якого наведені на рис. 4.1.

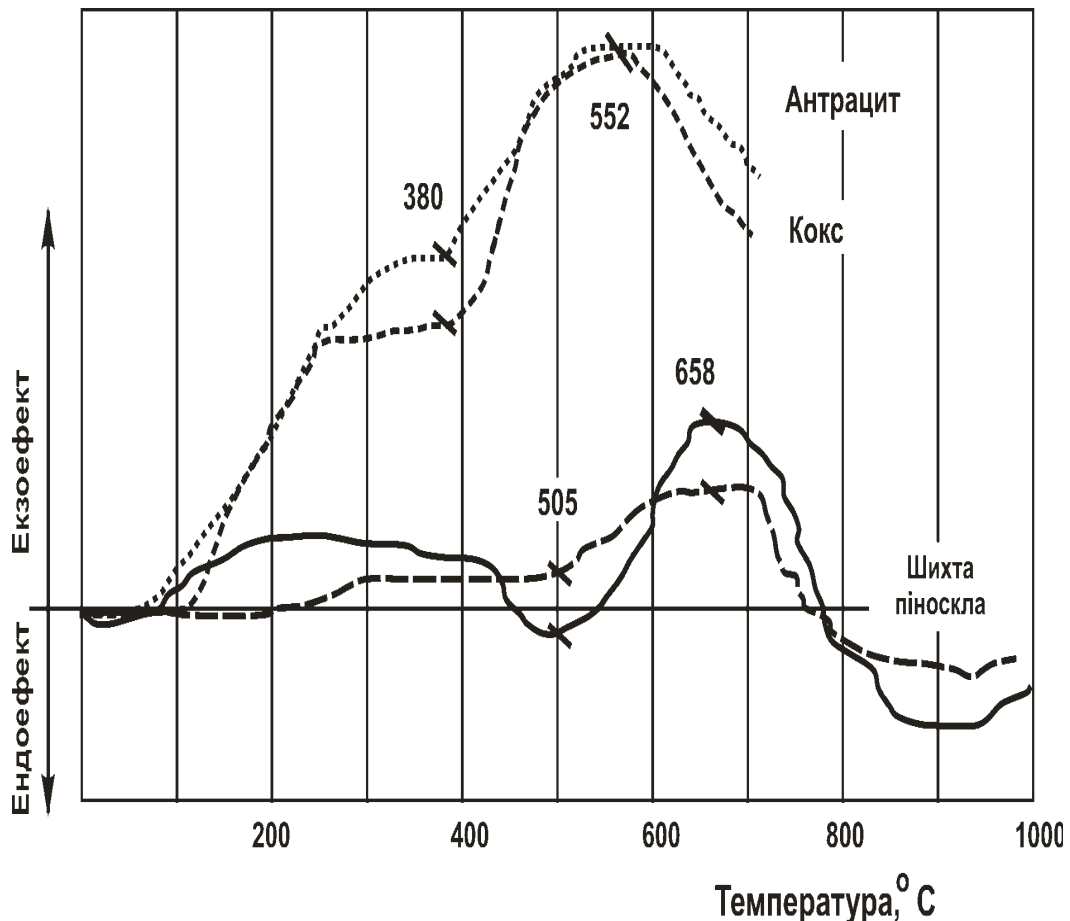


Рис. 4.1. ДТА газотворювачів та шихт для виробництва піноскла

Термограми антрациту і коксу подібні. Після нагрівання на диференціальних кривих спостерігаємо екзоефекти. Це пов'язано з тим, що коефіцієнт теплопровідності вуглецю має більш високе значення в порівнянні з еталоном (оксидом алюмінію).

Екзоефект окиснення вуглецю в двох випадках починається практично при однаковій температурі 380 °С. Максимум спостерігаємо при температурі 552 °С. Аналогічний перебіг кривих свідчить про можливість застосування як одного, так і іншого газотворювача. З двох альтернатив перевага віддана антрациту, як більш дешевому.

Після вибору газотворювача, подальші дослідження проводилися з шихтами, в які додано антрацит. На рисунку наведені криві для двох дослідів. Екзоефект спостерігаємо при більш високих температурах, приблизно 505 °С (максимум при 658 °С).

Тобто, теоретично, вигорання вуглецю починається задовго до нагрівання скла до температури пластичного стану. У верхніх прошарках шихти може відбуватися втрата газотворювача. І це підтверджується при одержанні лабораторних зразків. Зовнішні шари піноскла мають істотно більш світлий відтінок. Навіть при 505 °С шихта має залишкову відкриту пористість, і процес вигорання може продовжуватися.

Результати ДТА доводять, що ймовірність втрат газотворювача достатньо велика. Для їхнього попередження потрібен більш швидкий нагрів аж до досягнення склом пластичного стану.

4.2 Дослідження шихти термогравіметричним методом

Дослідження теплових ефектів при аналізі фізико-хімічних перетворень вдало доповнюються вивченням зміни маси речовини при нагріванні.

Порцелянові тиглі зважували, заповнювали довільною кількістю шихти. Тиглі з шихтою висушували у сушильній шафі, охолоджували в

ексикаторі, а потім знову зважували. Різниця в показаннях двох зважувань дозволяє визначити масу наважки.

Тиглі були поміщені в муфельну піч, їх нагрівали за заданим режимом. Після досягнення потрібних температур, що вибиралися з постійним кроком 25°C , тиглі вилучали. Спочатку їх охолоджували на повітрі, а потім і в ексикаторі. Після цього зважували. Визначали масу наважки після випалу та загальну втрату маси у відсотках по відношенню до початкової наважки в результаті нагрівання аж до відповідної температури. Результати термогравіметричного (ТГ) аналізу наведені на рис. 4.2.

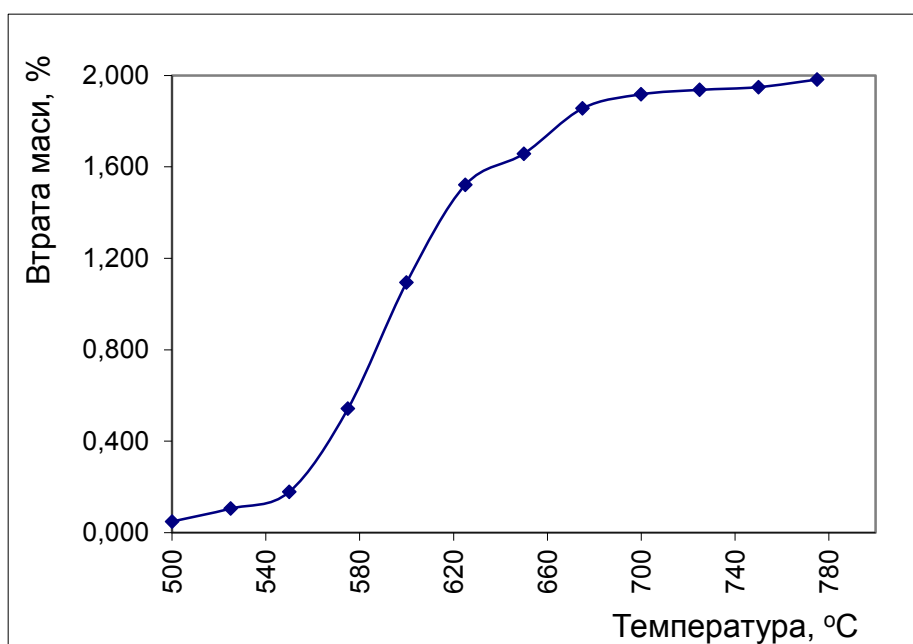


Рис. 4.2. Результати ТГ аналізу

Як видно з даних термогравіметричного аналізу, суттєва втрата маси починається при 500°C . Ці результати корелюють із даними ДТА, екзоефект у шихті якого починався при температурі приблизно 505°C .

Швидка втрата маси спостерігається в інтервалі $(575-625)^{\circ}\text{C}$, а потім сповільнюється. Після 700°C крива наближається до значення, що може бути оцінене в 2%. Хід кривої може бути пов'язаний з тим, що при температурах біля 625°C зникає відкрита пористість.

4.2.1 Визначення режиму спінювання

Досліджені температурні параметри спінювання фізико-хімічними методами. Користуючись літературними даними та попередніми дослідженнями, щоб встановити режим спінювання, було вирішено використовували температуру 860 °С, враховуючи тривалість витримки зразків, що складала - 5, 10, 15, 20, 25 і 30 хвилин.

На рис. 4.3 приведено кінетику спінювання скла при даних умовах дослідження та фото середнього вертикального перетину зразків для кожної тривалості витримки. На графіку приведено залежність висоти зразка, а також прогнозована маса піноскла від тривалості витримки поточних значень температур.

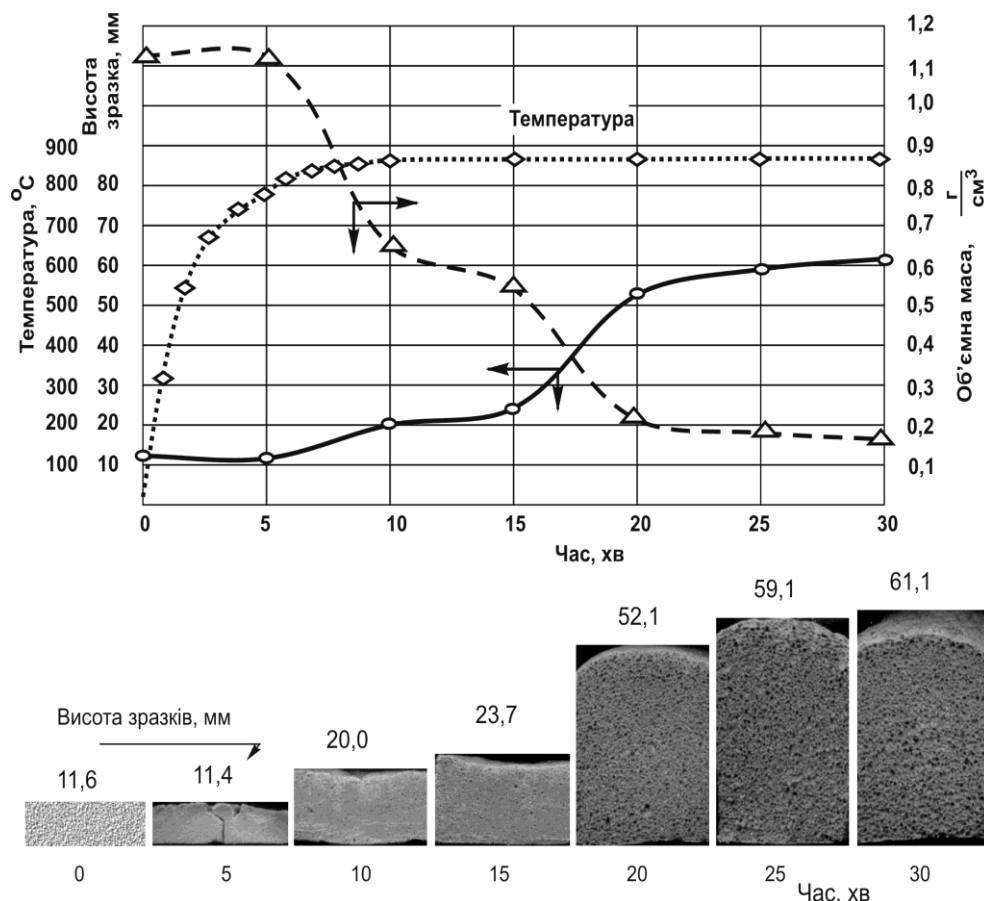


Рис. 4.3. Кінетика спінювання скла та утворення пінистої структури

З результатів досліджень видно, що через 5 хвилин спостерігається усадка шихти з утворенням моноліту. Починаючи з 10-ої хвилини,

спостерігається спінювання, що починає інтенсивно розвиватися після 15-ої хвилини. При подальшому нагріванні темп спінювання сповільнюється і до 30-ої хвилини висота зразка сягає максимуму. Зразок мав задовільну коміркову структуру. Об'ємна маса зразка становила $0,19 \text{ г/см}^3$.

4.3 Оптимізація температурних параметрів

Властивості піноскла залежать від температурних параметрів і тривалості процесів їх виготовлення. Для встановлення оптимальних параметрів за вказаною методикою були виготовлені лабораторні зразки піноскла при різних температурах і термінах витримки. В експериментах використовуються наступні температури: 840°C , 850°C , 860°C . Терміни витримки: 5, 10, 15, 20, 25 і 30 хвилин.

Одержані зразки вивчали візуально. Пори повинні мати розмір 2 мм і більше. Допускаються також пори розміром 5 мм. Фото поперечних перерізів зразків надані на рис. 4.4. Зразки виготовлені при температурі 840°C при тривалості витримки 20 хв., при температурі 850°C при тривалості витримки 15 -20 хв., при температурі 860°C при тривалості витримки 15 хв. відповідають вимогам до будівельних матеріалів із піноскла.

Вплив температурних параметрів і тривалості процесів на властивості піноскла в більшості випадків різноплановий. Незначна зміна температури або тривалості процесів може покращувати одні властивості й одночасно погіршувати інші. Було виготовлено вісімнадцять зразків з різними температурами й термінами витримки. Одержані зразки після відпалу розпилювали й аналізували візуально. Фото зрізів зразків наведені на рис. 4.4.

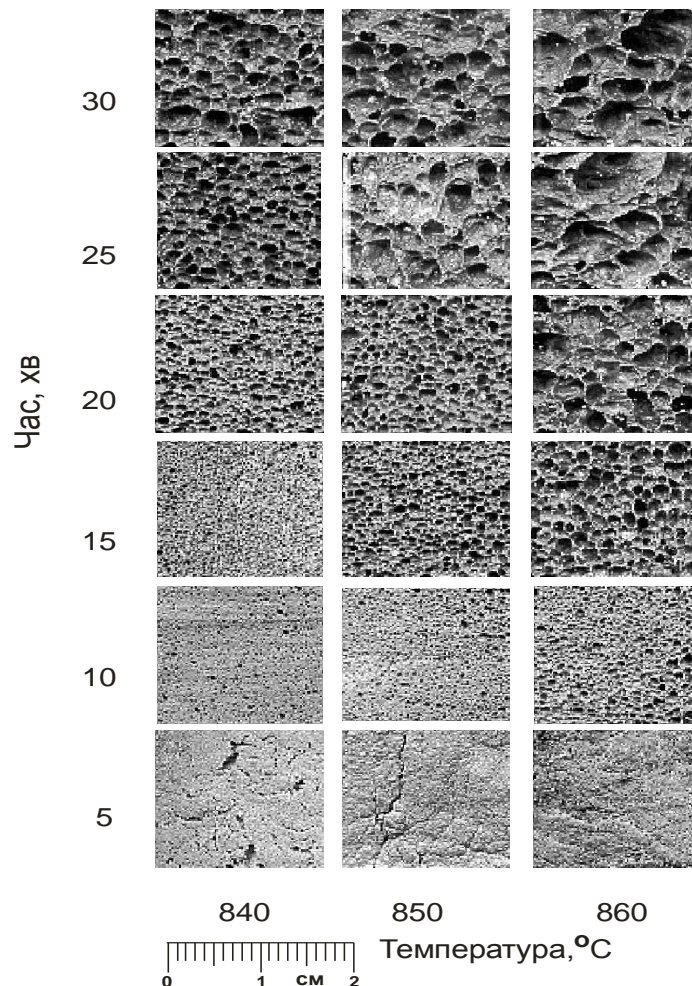


Рис. 4.4. Залежність пористої структури піноскла від температури і тривалості спінювання

При витримці 5 хв. для обраних температур спостерігається спікання й оплавлення матеріалу. Розпилюванню зразки не піддавалися. На рисунку видно зображення нижньої поверхні. Поверхня зразків тріщинувата, складчаста. Пористість відсутня. При витримці 10 хв. помітний вплив температури випалу. В температурному інтервалі 840 – 850 °C матеріал залишається без пор, при 850 °C помітно утворення пористої структури. У більшій частині об'єму пори дрібні розміром до 1- 2 мм. При витримці 15 хв. при 840 °C спостерігається аналогічна картина. Помітні пори розміром до 1-2 мм, при 850 °C спостерігається досить рівномірна пористість. Розміри пор у переважній більшості випадків не перевищують 2-х міліметрів. При 850 °C вже домінують пори розміром 2-3 мм.

При витримці 20 хв. для 840 °С спостерігається досить однорідна пориста структура, пори розміром максимум 2-3 мм. Для температури 850 °С спостерігається рівномірна пористість з розміром пор більше 3 мм. При 850 °С з'являються пори розміром більше 5 мм, а також сполучені пори. При витримці 25 хв. для 840 °С спостерігається рівномірна структура – більша частка пор розміром більше 2 мм, однак вони не перевищують 5 мм. При 850 °С вже видно, що з'являється значна кількість пор розміром більше 5 мм (до 7 мм). Присутні також і сполучені пори. Підвищення температури до 850 °С погіршує результат. При витримці 30 хв. спостерігається «перепал», який найбільшою мірою проявляється при температурі 850 °С.

4.4 Визначення об'ємної маси піноскла

Об'ємну масу визначали різними методами. У випадку, коли зразки піноскла мали не правильну геометричну форму, об'єм зразків визначали гідростатичним методом. Суть методу полягала у визначенні об'єму (або маси) води, що витіснялася з посудини після повного занурення даного зразка у воду.

Коли вдавалося одержати зразок правильної геометричної форми (паралелепіпед), об'єм розраховували. Отже, масу зразків у всіх випадках визначали шляхом зважування на аналітичних терезах. На рис. 4.5 наведені криві залежності об'ємної маси від тривалості спінювання для температур: 840, 850, 860 °С.

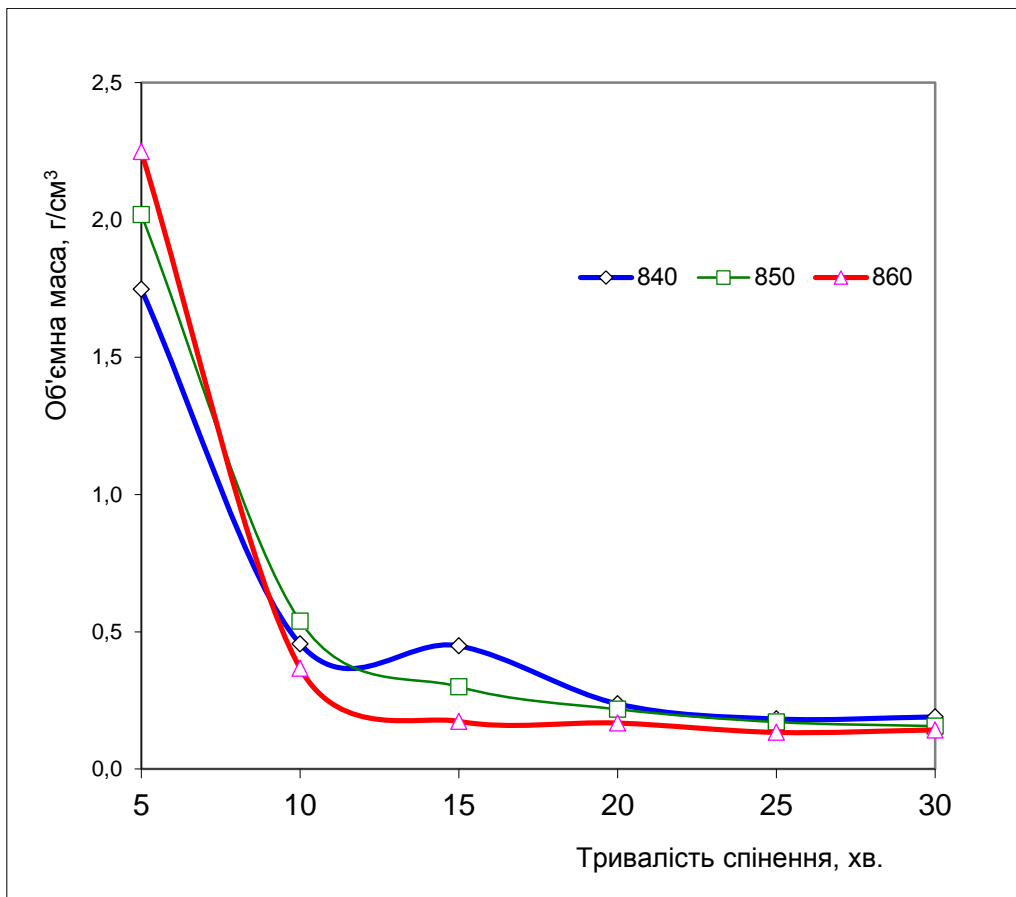


Рис. 4.5. Залежність об'єму маси піноскла від температури і тривалості спінювання

З отриманих даних видно, що об'ємна маса спочатку стрімко зменшується до 10-ї хв., потім темп уповільнюється, починаючи з 20-ї хв. значення стабілізуються на рівні $0,2 \text{ г/см}^3$.

Для середньої температури (850 °C) значення в двох випадках займає проміжне положення. Пояснюється це тим, що до 5-ї хв. відбувається оплавлення. Для вищих температур це явище більш виражене. Із перебігом певного часу, у нашому випадку - п'яти хвилин, починається спінювання й зменшення об'ємної маси.

В інтервалі від 10 до 20 хвилини крива для температури 840 °C проходить вище інших, а для максимальної температури 860 °C нижче. Стабілізація значень на кінцевому рівні $0,2 \text{ г/см}^3$ спостерігається для 840 °C на 20-й хвилині, 850 °C - на 15-й хвилині, для 860 °C - на 10-й хвилині.

Як видно, піноскло з об'ємною масою менше $0,2 \text{ г/см}^3$ можна одержати:

- при 840 °C і тривалості витримки більше 4,8 хвилин;
- при 850 °C і тривалості витримки більше 4,6 хвилин;
- при 860 °C і тривалості витримки більше 3,5 хвилин.

4.5 Дослідження взаємодії піноскла з водою

Піноскло може адсорбувати вологу. Теплоізоляційне піноскло, яке має закриту пористість, повинно мати мінімальне водопоглинання. Оцінити взаємодію піноскла з водою можна за двома показниками:

- водопоглинанням, %
- товщиною поверхневої плівки, мм.

Останній показник визначається, якщо водопоглинання низьке, він показує, що вся вода, яка адсорбується, втримується на поверхні й у межах 1-2-х зруйнованих комірок. У такому випадку можна оцінювати ефективну товщину зовнішнього шару.

4.6 Дослідження водопоглинання піноскла

На рис. 4.6 показана залежність водопоглинання піноскла від тривалості витримки та температури спінювання. Слід розглянути різний хід кривих для вивчених температур. Крива для максимальної температури (860 °C) проходить вище інших, крива для мінімальної температури (840 °C) відповідно нижче усіх кривих. Крива для проміжної температури (850 °C) займає проміжне положення. На останній стадії температурної витримки водопоглинання для 860 °C становить близько 4,5%, для 850 °C - близько 3,4%, для 840 °C - 2,5%.

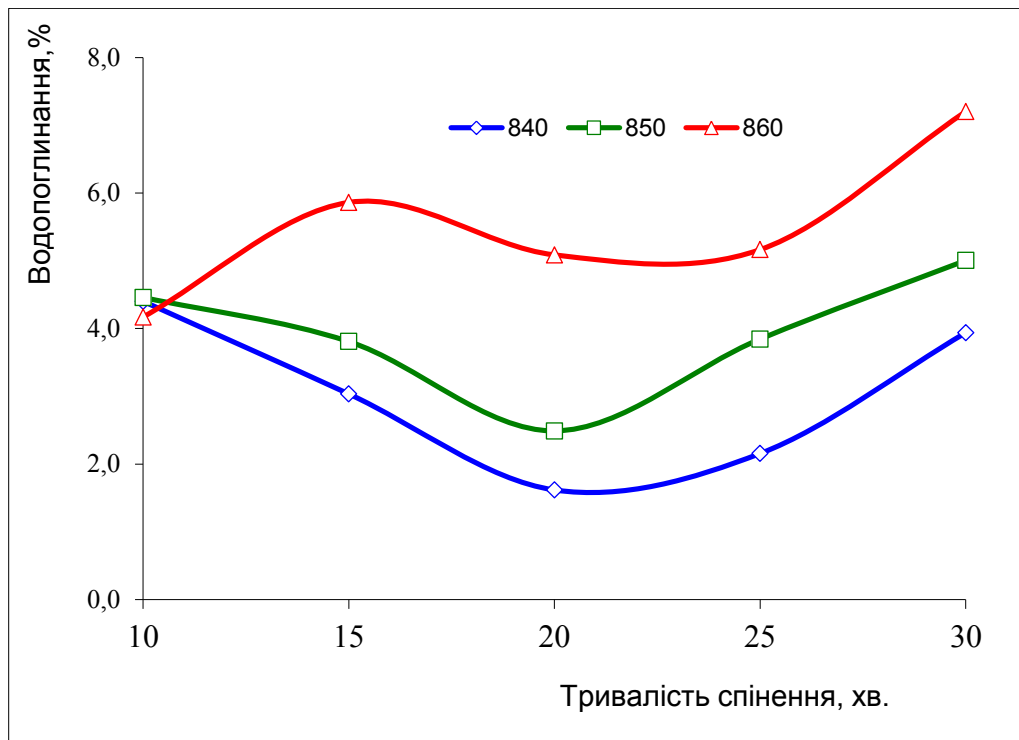


Рис. 4.6. Залежність водопоглинання від температури і тривалості спінювання

Водопоглинання при більшій температурі для будь-якого моменту часу більше і це пояснюється наступним. Більшій температурі відповідає завжди і більший розмір пор. Якщо припустити, що воду буде втримувати тільки 1-2 зовнішніх зруйнованих шарів пор, то, природньо, що більші пори збережуть у собі й більшу кількість води. Якщо зменшити водопоглинання бажано було б і зменшувати обидва ці параметри. Однак існує межа. Прийнятні умови температури і тривалості витримки повинні вирішувати комплекс інших параметрів. Слід сказати, що навіть небажане значення водопоглинання в нашому випадку не перевищує 5%. А це значення допускається всіма стандартами.

Якщо об'єм води, який був адсорбований зразком, віднести до площі поверхні зразка, то одержимо величину, що є ефективною товщиною зовнішнього шару з водою (плівки).

Можна сказати, що товщина такої плівки не перевищує 0,6 мм.

4.7 Дослідження пористості отриманих зразків

Розрізняють істинну, закриту й відкриту пористості. Відкрита пористість - це водопоглинання. Закрита пористість - це різниця між істинною та відкритою пористістю.

Істинна пористість була отримана розрахунковим шляхом. Графічна залежність пористості від тривалостей витримки й температури спінювання представлена на рис. 4.7.

Як видно з приведених даних, пористість дуже швидко зростає до 10-ї хвилини, потім її значення стабілізується. Криві проходять тим вище, чим більша температура спінювання. Деяке зменшення пористості на кінцевому етапі для температури 860 °С пояснюється «закриттям» пор у зв'язку з низькою в'язкістю скломаси.

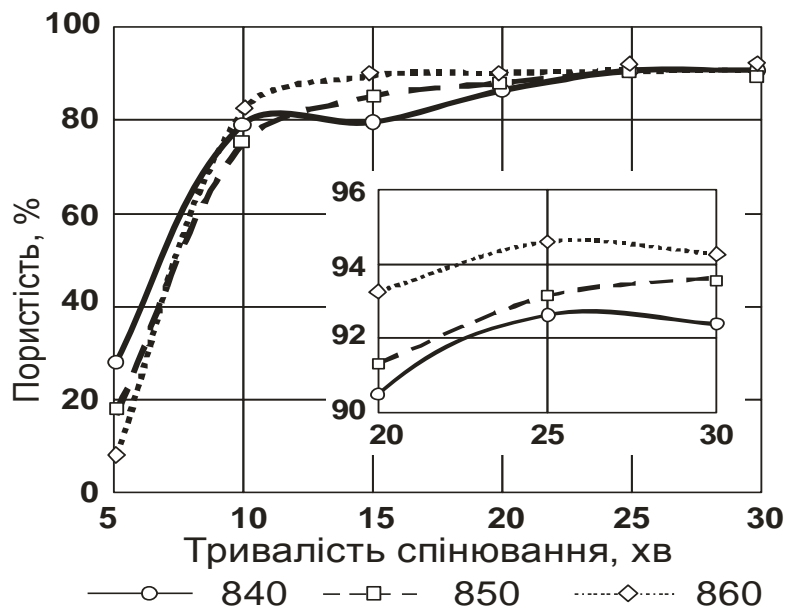


Рис. 4.7. Залежність пористості від температури і тривалості спінювання

Максимальна пористість, що була отримана, дорівнює 95% при температурі 860 °С і тривалості витримки 25 хвилин.

З рис. 4.7. видно, що значення пористості, що перевищують 90% можуть бути отримані:

- при 840 °С і тривалості витримки більше 19 хвилин;

- при 850 °C і тривалості витримки більше 16 хвилин;
- при 860 °C і тривалості витримки більше 13 хвилин.

4.8 Дослідження ударної в'язкості піноскла

Залежність ударної в'язкості від таких параметрів як температура й тривалість витримки приведена на рис. 4.8. З рисунку видно, що для всіх температур витримки ударна в'язкість спочатку зростає, досягаючи свого максимуму до 15 – 20 хв., а потім для всіх температур починає знижуватись. Так для температури 860 °C максимум досягається раніше. Для більш низьких температур дослідженого діапазону максимум настає пізніше.

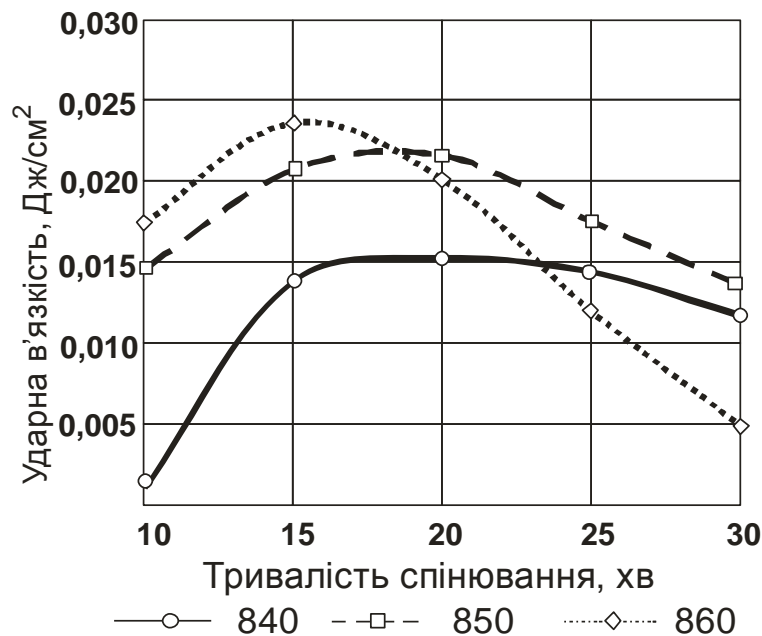


Рис. 4.8. Залежність ударної в'язкості від температури і тривалості спінювання

Потрібно відзначити, найвище значення ударної в'язкості досягається для 860 °C, однак надалі стрімко починається її падіння. До 25-ї хвилини показник стає найнижчим.

Найбільш стабільні показники спостерігаються для зразків, що спінювали при температурі 850 °C. Після 20-ї хвилини спінювання у всіх випадках спостерігається зменшення ударної в'язкості, але у цьому випадку

зберігаються найвищі значення. Вищі і більш низькі температури спінювання призводять до «перепапу» й «недопапу».

З рисунку 4.8, видно, що неможливо одержати ударну в'язкість більше $0,02 \text{ Дж/см}^2$. Для досягнення оптимальних значень ударної в'язкості процес спінювання необхідно проводити при температурі 850°C і тривалості витримки 20 хвилин, або при температурі 860°C і тривалості витримки 15 хвилин.

4.9 Дослідження отриманих зразків на міцність на вигин

Результати розрахунку міцності на згин представлені на рис. 4.9.

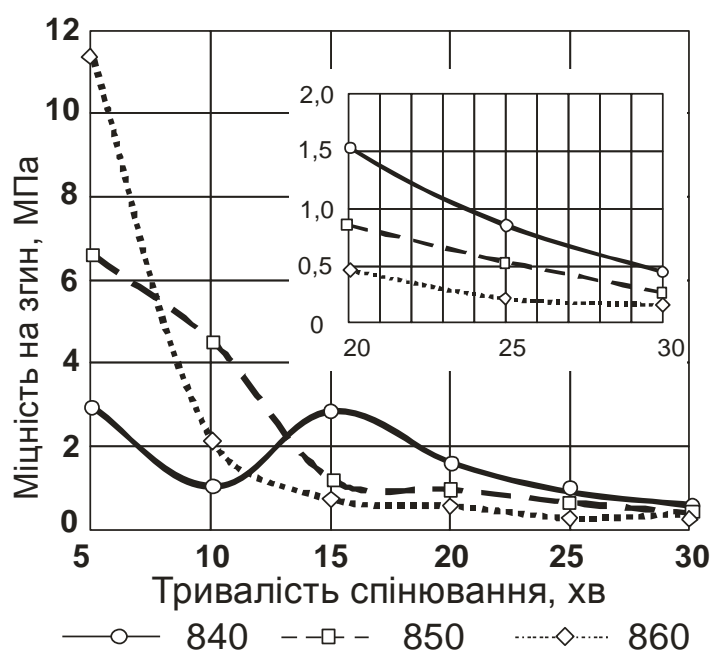


Рис. 4.9. Залежність міцності на згин від температури і тривалості спінювання

Зрозуміло, що на початковій стадії спінювання найбільша міцність спостерігається для зразків, термооброблених при максимальних температурах, досліджуваного інтервалу – 860°C . При зменшенні температури міцність закономірно знижується. Це спостерігається на стадії моноліту. Чим більша температура, тим глибше проходить спікання, тому тим менше пористість і тим міцніше матеріал.

Початкова стадія не представляє інтересу, оскільки ще не сформована необхідна пориста структура. Для тривалості процесу спінювання, після 15-ї хвилини картина змінюється. Найміцніші на вигин, виявляються зразки, які спінюються при 840 °С. Отримані результати добре корелюють з даними досліджень ударної в'язкості. Однак, це різні показники міцності. Ударна в'язкість відображає крихкість матеріалу. Матеріал може бути міцним, але в той же час і крихким, що й спостерігається для 840 °С.

Відповідно до стандартів міцність на вигин має бути не менша 0,4 МПа, тому можна вважати раціональним: температуру отримання піноскла 840 °С для будь-якої тривалості витримки, до 30 хвилин; температуру 850 °С при тривалості не більше 27 хвилин.

В інтервалі температур 840÷860 °С і при тривалості спінювання 20÷30 хвилин можна отримати піноскло, яке за своїми характеристиками рекомендоване для промислового виготовлення з такими основними характеристиками:

Об'ємна маса - $0,15 \div 0,2 \text{ г/см}^3$;

Міцність на згин - $0,2 \div 0,5 \text{ МПа}$;

Водопоглинання – $2,0 \div 4,5 \%$;

Ударна в'язкість - $0,005 \div 0,015 \text{ Дж/см}^2$;

Пористість - $91 \div 95 \%$.

РОЗДІЛ 5 ЗАВОД З ВИРОБНИЦТВА ЛИСТОВОГО СКЛА ТА ДІЛЯНКА З ВИРОБНИЦТВА ПІНОСКЛА

5.1 Вхідні дані

Можливість одержання піноскла, а також його експлуатаційні властивості визначаються температурним полем, що виникає у початковій засипці шихти, а потім у спіненій масі. Оптимізація технологічного процесу спінювання можлива тільки при оптимізації температурного поля. Нагрів форми і її вмісту здійснюється за рахунок випромінення і конвективної тепловіддачі від факелу й огорожень полуменевого простору.

Для моделювання була прийнята класична схема одержання піноскла, подана на рис. 5.1. На рисунку показана найбільш принципова частина печі спінювання - власне зона спінювання. Зона охолодження і стабілізації не приведені. Вони не мають принципового значення. На якість продукції впливає в першу чергу еволюція температурного поля саме в цій зоні.

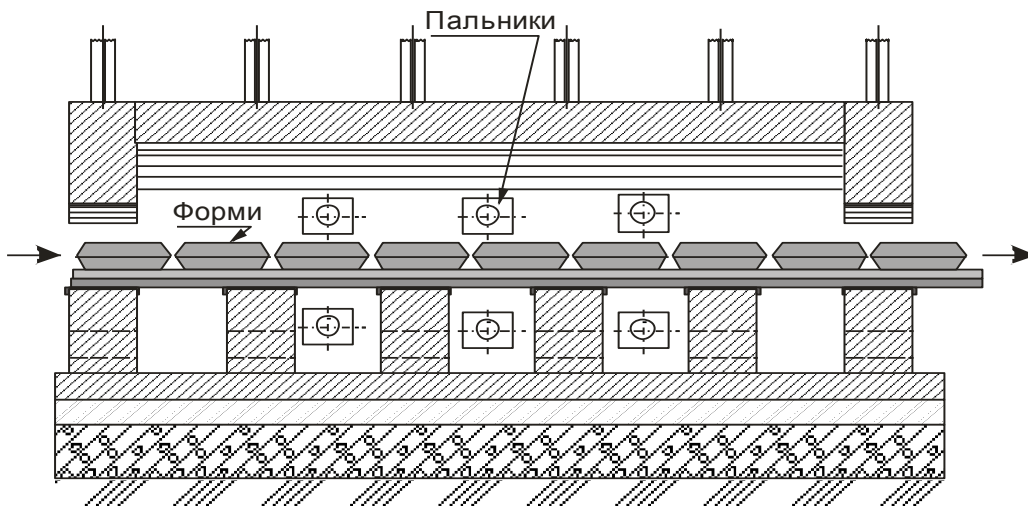


Рис. 5.1. Промислова схема виготовлення піноскла, що прийнята
для моделювання (зона спінювання)

Металеві форми з шихтою переміщуються зліва праворуч за рахунок дії штовхачів. Форми ковзають по каблучках, розташованих у повздовжніх

направляючих, що мають П-подібну форму (швелери). Переміщення форм - переривисте. Цикл штовхання форм - $9\div 10$ хвилин. Як видно з рисунка, у зоні спінювання форма проходить $9\div 10$ позицій. Таким чином, час перебування форм у цій зоні складає $\sim 1,5$ години.

Нагрів форм здійснюється за рахунок радіаційного і конвективного теплообміну. Верх форми нагрівається за рахунок теплового потоку, що надходить від факелу і вогнетривкої кладки полуменевого простору. Полуменевий простір - спільний для всієї зони спінювання.

Знизу форми нагріваються за рахунок теплового потоку, що надходить від факелу і вогнетривкої кладки полуменевого простору. Полуменевий простір виконаний у вигляді секцій, розділених вогнетривкими стінками, необхідними для опор направляючих швелерів. У бічних стінках печі (вище і нижче форм) є вікна, у яких розташовані форсунки пальників.

Об'єктом моделювання (рис. 5.2.) є наступна система: форма і її вміст. Під останнім передбачається спочатку вихідна шихта, а потім спінена маса.

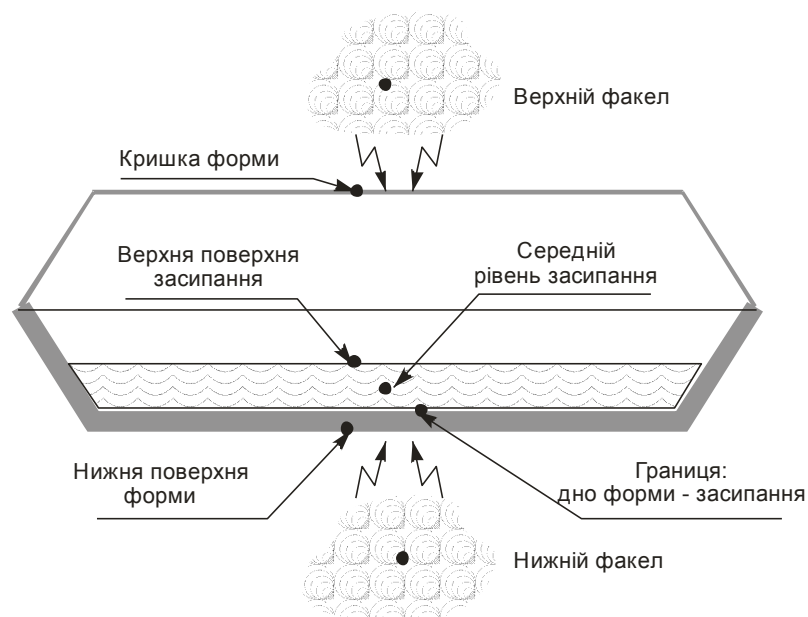


Рис. 5.2. Схема об'єкту моделювання (металева форма і шихта, що спінюється)

Форма складається з двох частин: власне форми і кришки. Вони являють собою усічені чотирикутні піраміди. Нижня частина (власне форма)

виконана з жаростійкого чавуну. Товщина стінок - 1 см. Кришка виготовлена з жаростійкої сталі товщиною 2 мм. Товщина початкового засипання шихти складає приблизно 2 см. Після спінювання товщина піноскла може сягати 12 см і заповнювати усю форму по висоті. Відстань між дном і кришкою - 12 см.

Розмір форми в плані: (500×550) мм. Тому, навіть при максимальному спінюванні, задача може розглядатися як одновимірна.

На рис. 5.2 позначені принципові просторові координати температур, які будуть використані в розрахунках.

Температура кришки і температура нижньої поверхні дна форми будуть задаватися відповідно до граничних умов I роду. При цьому через малу товщину кришки, будемо вважати, що перепадів температур по цій товщині не існує (ізотермічні умови). Товщина дна достатньо велика, тому по товщині дна температура буде прораховуватися методом сіток. Точно так буде прораховуватися температурне поле по товщині засипки (потім і спіненої маси). З цього масиву температур буде також фіксуватися і температура на середньому рівні засипки.

На границі: дно форми - засипка будуть задаватися граничні умови IV роду. Температура на верхній поверхні засипки (спіненої маси) буде розраховуватися виходячи з граничних умов II роду, а в деяких випадках і III роду. Температура кришки форми буде розраховуватися як середньо геометрична між температурами верхнього факелу і температурою верхньої поверхні засипання (спіненої маси).

У розрахунках використані такі характеристики матеріалів:

Метал форм: Коефіцієнт теплопровідності - $30 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, питома масова теплоємність - $0,56 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, густина - $7200 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Засипка— спінена маса: Коефіцієнт теплопровідності - $0,5 - 0,1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, питома масова теплоємність - $1,0 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, густина - $1,0 - 0,2 \text{ кг}/\text{м}^3$.

5.2 Теплообмін по симетрії нагрівання

Ідеальним варіантом термічного впливу на засипку і потім на спінену масу був би безградієнтний нагрів. Проте перепади температур по товщині шару неминучі через досить низькі значення теплопровідності шихти і спіненої маси. Єдине, до чого можна прагнути, так це до симетрії температурного поля у виробі. У такому випадку за інших рівних умов перепади температур у виробі будуть мінімальними. На перший погляд цього можна досягти при симетрії термічного впливу на систему: засипка - форма з боку факелу.

У першому варіанті розрахунку був реалізований випадок, коли температура випромінювача (факелу) зверху і знизу форми на кожній позиції рівні між собою. На шести позиціях ці температури приймали відповідно значення: 400, 500, 600, 700, 800, 900 °C.

Температурне поле в шарі до моменту закінчення витримки на кожній позиції (10 хв.) залишається асиметричним. Це пов'язано з тим, що товстостінне дно форми, через високу теплоємність акумулює багато теплоти, що не забезпечує належний прогрів засипки знизу.

Для досягнення температурної симетрії у виробі необхідно, щоб температура факелу поверх форми протягом всього часу термообробки була нижча, ніж знизу форми.

5.3 Оптимізація температурного режиму термообробки

Враховуючи літературні дані та попередні дослідження для практичних цілей можна рекомендувати наступний варіант.

Тривалість перебування форми на кожній позиції можна скоротити до 9 хвилин. Оскільки в зоні спінювання форма перебуває послідовно на 9 позиціях, у даному варіанті моделі увесь час перебування форми в печі спінювання складе 81 хвилину. Рекомендований температурний режим

газового простору зверху і знизу можна представити у вигляді наступної табл. 5.1.

Таблиця 5.1 - Рекомендований режим термообробки

Позиція	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Температура зверху форм, °C	300	500	600	700	800	850	850	850	700
Температура знизу форм, °C	400	600	620	720	820	870	870	850	500

На перших чотирьох позиціях, поки вміст форми являє собою переважно початкову засипку шихти (товщина розрахункового шару ≈ 2 см), у якій коефіцієнт теплопровідності відносно великий, перепади температур по товщині шару мінімальні. Тільки на початку кожного чергового циклу температура верхньої поверхні шихти починає істотно випереджати всі інші температури в шарі. До кінця кожного циклу відбувається істотне вирівнювання температур у шарі. Після досягнення температури в шарі шихти (700 °C) починається інтенсивне спінювання і збільшення товщини виробу. Значне зменшення коефіцієнта теплопровідності піни в порівнянні з вихідною шихтою призводить до загального збільшення перепадів температур по товщині виробу. Особливо це помітно для температури середнього рівня для позицій 5-8. До моменту закінчення перебування виробу на 8-ій позиції температурне поле у виробі практично гомогенізується. Це пов'язано з припиненням зовнішнього нагрівання і зі стабілізацією температур верхнього і нижнього газового простору на позиціях 6,7,8. Після такої термостабілізації проводиться інтенсивне охолодження по обидва боки для стабілізації піни. Температура газового простору зверху повинна бути знижена до 700 °C, знизу - до 500 °C.

Якщо припустити, що температурний інтервал активного спінювання складає (800-850) °C, тоді тривалість перебування піноскла в цьому температурному інтервалі складе: верхній рівень - 27 хвилин; середній рівень

- 28 хвилин; нижній рівень - 30 хвилин. Це дозволяє припускати, що структура піноскла буде гомогенною.

5.4 Тепловий розрахунок печі. Вихідні дані теплового розрахунку

Розмірність величин, що входять у рівняння теплового балансу, «Х»- кВт.

Витрата палива - Х, кг/с буде фігурувати в розрахунках як невідома величина.

Цикл штовхання форм - 10 хвилин.

Маса однієї металевої форми - 45 кг.

Маса одного каблук (рольганга) - 6,35 кг.

Кількість каблуків, що приходяться на одну форму – 4.

Маса каблуків, що приходяться на одну форму - 25,4 кг.

Кількість формувальних комплектів в одному ряду – 3.

Маса металевого оснащення одного ряду - 211,2 кг.

Маса скляної шихти в одній формі - 4,5 кг.

Маса скляної шихти в одному ряду форм - 13,5 кг.

Швидкість надходження в піч скляної шихти $V_C = 0,0225$ кг/с.

Швидкість надходження в піч металевої оснастки $V_M = 0,352$ кг/с.

На рисунку 5.3 наведено схему потоків теплового балансу.

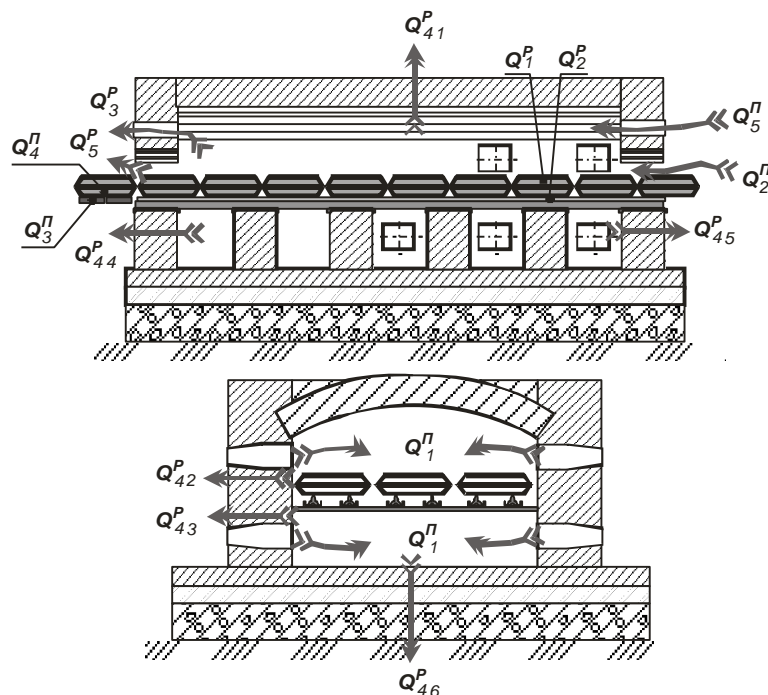


Рис. 5.3. Схема потоків теплового балансу

Паливо

Теплотворна спроможність дизельного палива $Q_{\text{нр}} = 40000 \text{ кДж/кг}$.

Витрати повітря на горіння при коефіцієнті надлишку повітря $\alpha = 1,2$
(за довідниковими даними) $L = 12,7 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Вихід димових газів при коефіцієнті надлишку повітря $\alpha = 1,2$ (по довідковим даним) $V = 13,3 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Таблиця 5.2 - Склад димових газів (при коефіцієнті надлишку повітря $\alpha = 1,2$), %

CO ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂
11,8	10,8	74,1	3,3

Температури:

Температура димових газів (верхнього факелу) - $T_{\text{ф}}^{\text{В}} = 900 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Температура димових газів нижнього факелу) - $T_{\text{ф}}^{\text{Н}} = 900 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Середня температура $900 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Температура (максимальна) спінювання скла $T_{\text{В}} = 860 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Температура димових газів, що відходять (продуктів горіння) $T_{\text{п.г.}} = 800 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Температура димових газів що надходять, із зони стабілізації $T_{\text{д.с.}} = 550 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Температура повітря, що надходить на горіння, $T_{\text{В}} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Початкова температура металевих форм, $T_{\text{М}} = 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Початкова температура шихти $T_{\text{Ш}} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Дані з теплоємності матеріалів, кДж/кг

Теплоємність скломаси - $C_{\text{ст}} = 1,26 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$.

Теплоємність чавунної оснастки (металу) - $C_{\text{м}} = 0,588 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$.

Теплоємність повітря - $C_{\text{в}} = 1,29 \text{ кДж}/\text{м}^3/\text{K}$.

5.4.1 Тепловий баланс зони спінювання. Статті надходження, кВт

1. Теплота, що надходить у піч в результаті спалювання палива - Q_I''

$$Q_I'' = Q_H^P \cdot X \quad (5.1)$$

$$Q_I'' = 40000 \cdot X,$$

де X - витрата мазуту, кг/с (X - невідома величина).

2. Теплота, що внесена в піч повітрям - Q_2^{Π}

$$Q_2^{\Pi} = L \cdot C_B \cdot T_B \cdot X \quad (5.2)$$

$$Q_2^{\Pi} = 327,66 \cdot X.$$

3. Теплота, що внесена в піч металевим формокомплектom - Q_3^{Π}

$$Q_3^{\Pi} = C_M \cdot T_M \cdot V_M \quad (5.3)$$

$$Q_3^{\Pi} = 62,0928.$$

4. Теплота, що внесена в піч шихтою - Q_4^{Π}

$$Q_4^{\Pi} = C_C \cdot T_{ш} \cdot V_C \quad (5.4)$$

$$Q_4^{\Pi} = 0,57$$

5. Теплота, що внесена в піч димовими газами з зони стабілізації - Q_5^{Π}

$$Q_5^{\Pi} = V \cdot C_D \cdot T_{д.с.} \cdot X \cdot g \quad (5.5)$$

де g - відношення витрати мазуту у зоні стабілізації відносно зони спінювання.

З урахуванням того, що в зоні стабілізації 1 пара пальників, а в зоні спінювання 5, g орієнтовно може бути прийнятий рівним 1/5.

C_D - теплоємність димових газів, розраховується за адитивною формулою:

$$C_D = 0,01 \cdot \sum C_i \cdot \%_i \quad (5.6)$$

для температур, що обмежують можливий інтервал температур: 500 і 900 °С.

Таблиця 5.3 - Теплоємність компонентів димових газів при температурах, кДж/(м³·К)

Компонент	CO ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂
i, %	11,8	10,8	74,1	3,3
T = 500 °С	1,98	1,59	1,33	1,4
T = 900 °С	2,17	1,7	1,38	1,46

Теплоємність при 500 °С дорівнює $1,44 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}$.

Теплоємність при 900 °С дорівнює $1,51 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}$.

Теплоємність при заданій температурі: 550 °С знаходимо шляхом інтерполяції: $C_D = 1,45 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}$.

$$Q_5^{\text{II}} = 2115,87 \cdot X,$$

Таким чином, надходження тепла складе:

$$Q_{\text{II}} = 62,66 + 42443,53 \cdot X.$$

5.4.2 Тепловий баланс зони спінювання. Статті витрат

1. Теплота нагрівання скла до максимальної температури - Q_1^P

$$Q_1^P = C_{\text{cm}} \cdot T_B \cdot V_C \quad (5.7)$$

$$Q_1^P = 24,38$$

2. Теплота нагрівання оснастки до максимальної температури - Q_2^P

$$Q_2^P = C_M \cdot T_B \cdot V_M \cdot \quad (5.8)$$

$$Q_2^P = 178,00.$$

3. Теплота продуктів горіння, що відходять - Q_3^P

$$Q_3^P = V \cdot C_{\text{п.г.}} \cdot T_{\text{п.г.}} \cdot X \cdot (1 + g), \quad (5.9)$$

де $C_{\text{п.г.}}$ - теплоємність продуктів горіння, розраховується за адитивною формулою аналогічно попередньому.

Теплоємність при заданій температурі 800 °С:

$$C_{\text{п.г.}} = 1,49 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}$$

$$Q_3^P = 19050,97 \cdot X.$$

4. Розрахунок теплових втрат через огороження печі - Q_4^P

$$Q_4^P = q \cdot F \quad (5.10)$$

Вихідні дані для розрахунку

Температура навколишнього повітря (у цеху) – 20 °С.

Габаритні розміри печі

Довжина - 4,3 м.

Ширина 3 м.

Висота печі (вище середнього рівня форм) - 1 м.

Висота печі (нижче середнього рівня форм) - 0,5 м.

Ширина завантажувальної кишені - 2 м.

Висота щілини завантажувальної кишені - 0,1 м.

Розрахункові величини:

Довжина дуги склепіння - 3,14 м.

Площа склепіння - 13,50 м²

Площа подовжніх стін (вище середнього рівня форм) - 8,60 м².

Площа подовжніх стін (нижче середнього рівня форм) - 4,30 м².

Площа кожної з торцевих стін печі - 4,50 м².

Площа печі в плані (дна), 12,90 м².

Дані кладки основних огорожень печі

Таблиця 5.4 - Склепіння

№ шару	Матеріал	$\lambda, \frac{Вт}{м \cdot К}$	$\delta, м$	$\delta/\lambda, \frac{м^2 \cdot К}{Вт}$
1	шамот	1,145	0,25	0,218341

Таблиця 5.5 - Подовжні стінки печі (вище форм)

№ шару	Матеріал	$\lambda, \frac{Вт}{м \cdot К}$	$\delta, м$	$\delta/\lambda, \frac{м^2 \cdot К}{Вт}$
1	шамот	1,145	0,5	0,436681

Таблиця 5.6 - Подовжні стінки печі (нижче форм)

№ шару	Матеріал	$\lambda, \frac{Вт}{м \cdot К}$	$\delta, м$	$\delta/\lambda, \frac{м^2 \cdot К}{Вт}$
1	шамот	1,145	0,5	0,436681

Таблиця 5.7 - Торцеві стінки печі з боку завантаження

№ шару	Матеріал	$\lambda, \frac{Вт}{м \cdot К}$	$\delta, м$	$\delta/\lambda, \frac{м^2 \cdot К}{Вт}$
1	шамот	1,145	0,5	0,436681

Таблиця 5.8 - Торцеві стінки печі з боку розвантаження

№ шару	Матеріал	$\lambda, \frac{Вт}{м \cdot К}$	$\delta, м$	$\delta/\lambda, \frac{м^2 \cdot К}{Вт}$
1	шамот	1,145	0,5	0,436681

Таблиця 5.9 - Дно басейну

№ шару	Матеріал	$\lambda, \frac{Вт}{м \cdot К}$	$\delta, м$	$\delta/\lambda, \frac{м^2 \cdot К}{Вт}$
1	шамот	1,145	0,15	0,131004
2	цегла.	0,755	0,15	0,198675
3	бетон	1,28	0,3	0,234375
			$\Sigma \delta/\lambda$	0,564055

Загальні втрати теплопередачі через кладку розраховуються як сума таких втрат через декілька характерних ділянок - $Q_{4(1)}^P$, $Q_{4(2)}^P$, і т.д.

В одну таку ділянку можуть бути об'єднані тільки ті елементи конструкції, для яких є однаковими:

- тепловий опір стінки - $\Sigma \delta/\lambda$;
- механізм теплопередачі.

Механізм теплопередачі для даної печі може бути двох видів:

- конвекція - теплопровідність – конвекція;
- конвекція – теплопровідність.

За першим механізмом йде теплопередача через склепіння і стінки печі, за другим механізмом - через дно печі.

Для кожної такої ділянки втрати в навколишнє середовище розраховуються за формулою:

$$Q_4^P = q \cdot F \quad (5.11)$$

Алгоритм розрахунків

Склепіння і стінки печі	Дно печі
<p>Задаємося температурою внутрішньої поверхні стінки: $t_{\text{пов.вн.}}$</p> <p>Задаємося температурою зовнішньої поверхні стінки: $t_{\text{пов.нар.}}$</p> <p>Розраховуємо перепади температур:</p>	
$\Delta t = t_{\text{н.г.}} - t_{\text{пов.вн.}} \quad (5.12)$ $\Delta t = t_{\text{пов.нар.}} - t_{\text{окр.ср.}} \quad (5.13)$ <p>Розраховуємо конвективні складові для обох поверхонь:</p>	$\Delta t = t_{\text{н.г.}} - t_{\text{пов.вн.}} \quad (5.12)$ <p>Розраховуємо конвективну складову для внутрішньої поверхні:</p>
$\alpha_{\text{конв}} = k^4 \sqrt{\Delta t} \quad , \quad (5.14)$ <p>де k - коефіцієнт, що залежить від просторового розташування стінки: $k = 3,3$ - для горизонтальної стінки, що контактує з газовим середовищем, що має більш високу температуру знизу, або більш низьку зверху; $k = 2,6$ - для вертикальної стінки; $k = 1,6$ - для горизонтальної стінки, що контактує з газовим середовищем, що має більш низьку температуру знизу.</p> <p>Розраховуємо потік радіацією від газу до внутрішньої стінки</p> $q_{\text{рад}} = 5,7 \cdot \varepsilon_{\text{г}} \cdot \left(\frac{T_{\text{н.г.}}}{100} \right)^4 \cdot A \quad , \quad (5.15)$ <p>де</p> $A = 1 - \left(\frac{T_{\text{пов.вн.}}}{T_{\text{н.г.}}} \right)^{3,6} \quad (5.16)$	
Розраховуємо потік випромінювання від зовнішньої стінки в атмосферу	

$q_{рад} = 5,7 \cdot \varepsilon_{ст} \cdot \left[\left(\frac{T_{пов.нар.}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{окр.ср.}}{100} \right)^4 \right] \quad (5.17)$ <p>Розраховуємо випромінюючу складову α для обох випадків</p>	Розраховуємо випромінюючу складову α для внутрішньої поверхні стінки
$\alpha_{рад} = \frac{q_{рад}}{\Delta t} \quad (5.18)$	
Розраховуємо коефіцієнт тепловіддачі конвекцією для обох випадків α_1 і α_2	Розраховуємо коефіцієнт тепловіддачі конвекцією для внутрішньої поверхні α_1
$\alpha = \alpha_{конв} + \alpha_{рад}. \quad (5.19)$	
Розраховуємо загальний коефіцієнт теплопередачі	
$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (5.20)$	$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta}{\lambda}}. \quad (5.21)$
Розраховуємо густину теплового потоку, Вт/м ²	
$q = K \cdot \Delta T, \quad (5.22)$	
де $\Delta T = t_{н.г.} - t_{окр.ср.} \quad (5.23)$	де $\Delta T = t_{н.г.} - t_{грунта} \quad (5.24)$
Перевіряємо температури	
$t_{пов.вн.} = t_{н.г.} - \frac{q}{\alpha_1} \quad (5.25)$	$t_{пов.вн.} = t_{н.г.} - \frac{q}{\alpha_1} \quad (5.25)$
$t_{пов.нар.} = t_{окр.ср.} + \frac{q}{\alpha_2} \quad (5.26)$	
Якщо розбіжність їхніх значень з тими, що задаються попередньо, - значні (десятки градусів), задаємося новими значеннями і повторюємо розрахунок; якщо розбіжність невелика (одиниці градусів) - розраховуємо загальні втрати для даної ділянки, кВт	

$$Q = 0,001 \cdot q \cdot F , \quad (5.27)$$

де F - площа ділянки, м^2 .

Якщо стінка багатошарова, то бажано розрахувати температури на границях між прошарками і графічно представити розподіл температур (у даному розрахунку приведені тільки графічні результати).

Температура на межі між першим і другим прошарками визначається за формулою:

$$t_1 = t_{\text{нов.вн.}} - q \cdot \frac{\delta_1}{\lambda_1} \quad (5.28)$$

між другим і третім:

$$t_2 = t_1 - q \cdot \frac{\delta_2}{\lambda_2} \quad (5.29)$$

і т.д.

Огородження полуменевого простору

Ступінь чорноти димових газів 0,3.

Температура навколишнього повітря (у цеху) 20°C .

Температура повітря між зоною спінювання і стабілізації 20°C .

Задаємося ступенем чорноти внутрішньої поверхні - 0,7.

Задаємося ступенем чорноти зовнішньої поверхні - 0,9.

Задаємося температурою в підшві фундаменту – 400°C .

Склепіння - Q_{4I}^P

Тепловий опір стінки (із попереднього розрахунку) $(\Sigma\delta/\lambda) = 0,22 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{K}}{\text{Вт}}$

Задаємося температурою внутрішньої поверхні – 868°C .

Перепад температур $\Delta t = t_{\text{н.г.}} - t_{\text{нов.вн.}} = 32^\circ\text{C}$ (див. 5.12)

Задаємося температурою зовнішньої поверхні: 167°C .

Перепад температур $\Delta t = t_{\text{нов.нар.}} - t_{\text{окр.ср.}} = 147^\circ\text{C}$ (див.5.13)

Коефіцієнт, що враховує тепловіддачу на внутрішній поверхні - 3,3.

Коефіцієнт, що враховує тепловіддачу на зовнішній поверхні - 3,3.

Розраховуємо конвективну складову $\alpha_1 - 7,85 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$ (5.14).

Розраховуємо радіаційну складову $\alpha_1 - 95,88 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$ (5.16-15-18)

Розраховуємо сумарне значення $\alpha_1 - 103,73 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$ (5.19).

Розраховуємо конвективну складову $\alpha_2 - 11,49 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$ (5.14).

Розраховуємо радіаційну складову $\alpha_2 - 10,51 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$ (5.17-18).

Розраховуємо сумарне значення $\alpha_2 - 22,00 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$ (5.19).

Розраховуємо коефіцієнт теплопередачі через огородження,

$$K = 3,66 \frac{Вт}{м^2 \cdot К} \quad (5.20).$$

Розраховуємо щільність теплового потоку через стінку,

$$q = 3218,28 \frac{Вт}{м^2} \quad (5.22).$$

Перевірка значення температур поверхонь.

Температура внутрішньої поверхні (із розрахунку) 869 °С (5.25).

Температура внутрішньої поверхні (що задана) 868 °С.

Розбаланс – 1 °С.

Температура зовнішньої поверхні (із розрахунку) [34]

– 166 °С (5.26)

Температура зовнішньої поверхні (що задана) – 167 °С

Розбаланс – 1 °С

Витрати теплоти через інші ділянки печі розраховуються за наданим вище алгоритмом.

Стіни (вище рівня форм) - Q_{42}^P .

Густина теплового потоку $q = 1740,07 \frac{Вт}{м^2}$.

Стіни (нижче рівня форм) - Q_{43}^P .

Густина теплового потоку $q = 1740,07 \frac{Вт}{м^2}$.

Торцева стінка з боку завантаження - Q_{44}^P .

Густина теплового потоку $q = 1740,07 \frac{Вт}{м^2}$

Торцева стінка з боку розвантаження - Q_{45}^P .

Густина теплового потоку $q = 1740,07 \frac{Вт}{м^2}$.

Дно печі - Q_{46}^P .

Густина теплового потоку $q = 871,42$.

Таблиця 5.10 - Зведені дані за тепловими втратами через огороження печі

Ділянка	Густина потоку, $\frac{Вт}{м^2}$	Площа ділянки, $м^2$	Втрати, кВт
Склепіння	3218,28	13,50	43,45
Стінки вище форм	1740,07	8,60	14,96
Стінки нижче форм	1740,07	4,30	7,48
Торцеві стіни з боку завантаження	1740,07	4,50	7,83
Торцеві стіни з боку розвантаження	1740,07	4,50	7,83
Дно	871,42	12,90	11,24
Загальні втрати через кладку Q_4^P			92,80

Втрати через випромінювання через отвори печі - Q_5^P розраховуються також для характерних ділянок, що об'єднуються подібністю геометрії і терморадіаційних характеристик розраховуються за формулою:

$$Q_5^P = 0,0057 \cdot F \cdot \left[\left(\frac{T_{изл}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{окр.пр.}}{100} \right)^4 \right] \cdot \varphi \text{ кВт}, \quad (5.30)$$

де $T_{изл}$ - температура випромінювача, К (температура факелу, продуктів горіння і т.д).

$T_{окр.пр.}$ - температура навколишнього простору, К.

Для завантажувальної кишені - це температура повітря в цеху, для впускників пальника - це середня температура задньої стінки пальників для двох циклів: евакуація продуктів горіння і нагрів повітря.

F - сумарна площа влетів пальників або площа завантажувальної кишені;

ϕ – коефіцієнт діафрагмування, що залежить від геометрії отвору.

Втрати випромінюванням через завантажувальний отвір

Ширина завантажувальної кишені - 2 м.

Висота щілини завантажувальної кишені - 0,1 м.

Площа завантажувальної кишені - 0,2 м².

Коефіцієнт діафрагмування ϕ вибираємо на підставі графіка, $\phi = 0,3$.

$$Q_5^P = 6,45$$

5.5 Підсумок теплового балансу

В результаті, статті витрати складуть: 301,63 + 19050,97 · X.

Надходження раніше складало: 62,66 + 42443,53 · X.

Підсумкове рівняння: 238,97 = 23392,56 · X.

Звідки: X = 0,010216.

Витрата мазуту складає: 0,01 кг/с

Результати обчислення теплового балансу наведені в табл. 5.11

Таблиця 5.11 - Зведена таблиця теплового балансу

Статті надходження		Статті витрат	
1. Теплота палива	408,63	1. Теплота нагрівання скла	24,38
2. Теплота повітря	3,35	2. Теплота нагрівання оснастки	178,00
3. Теплота формокомплекту	62,09	3. Теплота продуктів горіння	194,62
4. Теплота шихти	0,57	4. Через огороження печі	92,80
5. Теплота димових газів із зони стабілізації	21,62	5. Через отвори в печі	6,45
Разом	496,25	Разом	496,25

К.П.Д. печі складає: 4,91%

На подальших рисунках (рис.5.4-5.9) наведені діаграми, що ілюструють результати обчислень теплового балансу.

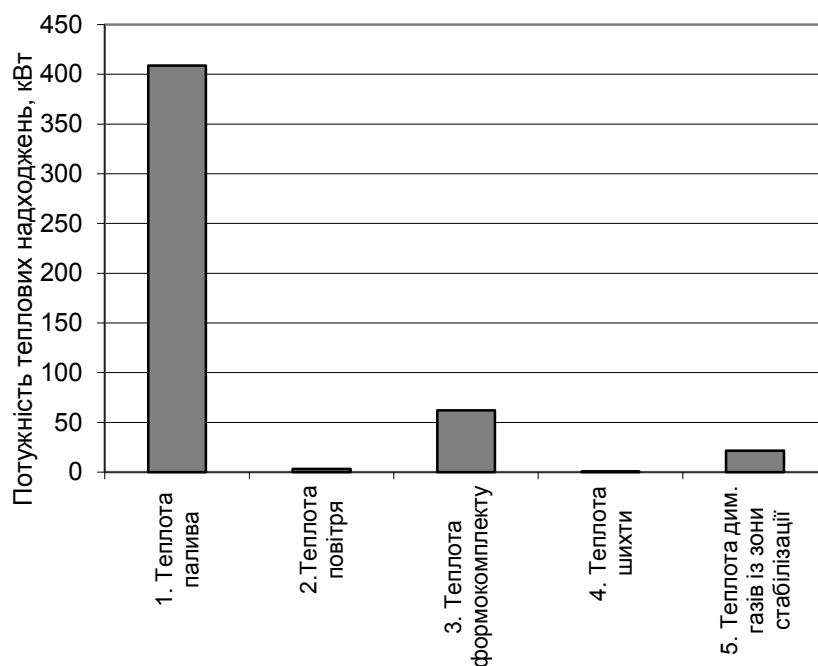


Рис. 5.4. Баланс статей надходжень

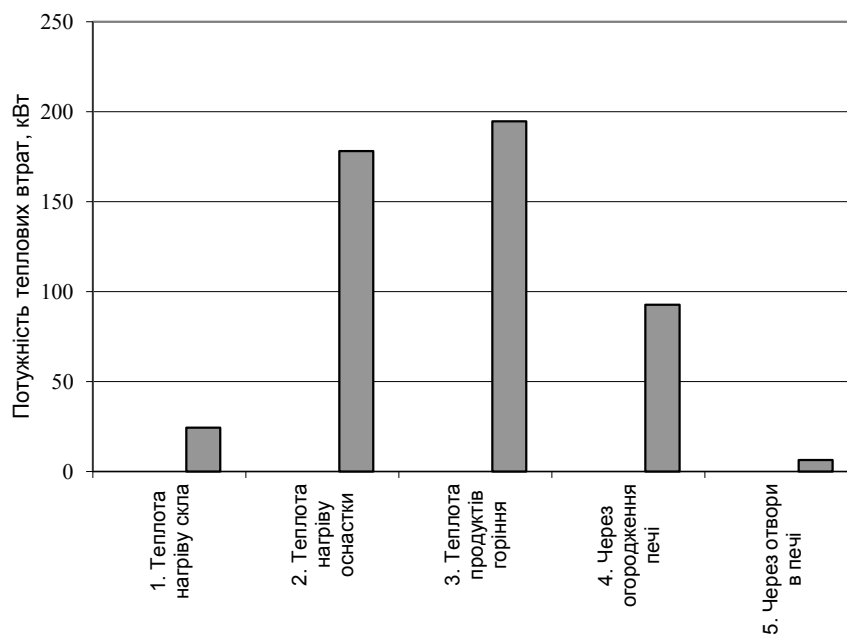


Рис.5.5. Статті витрат теплового балансу

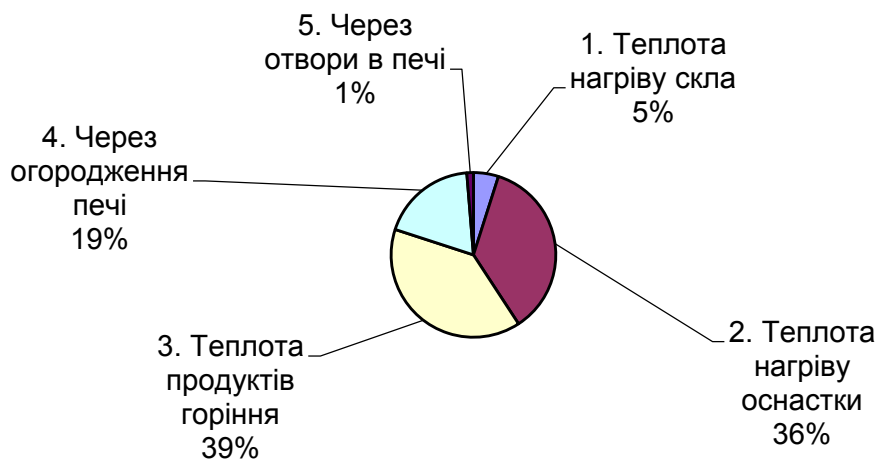


Рис. 5.6. Баланс статей надходжень

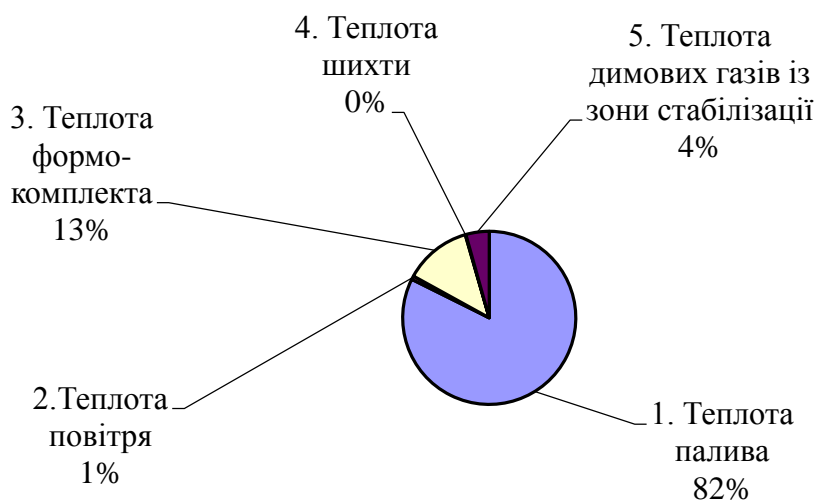


Рис. 5.7. Баланс статей витрат

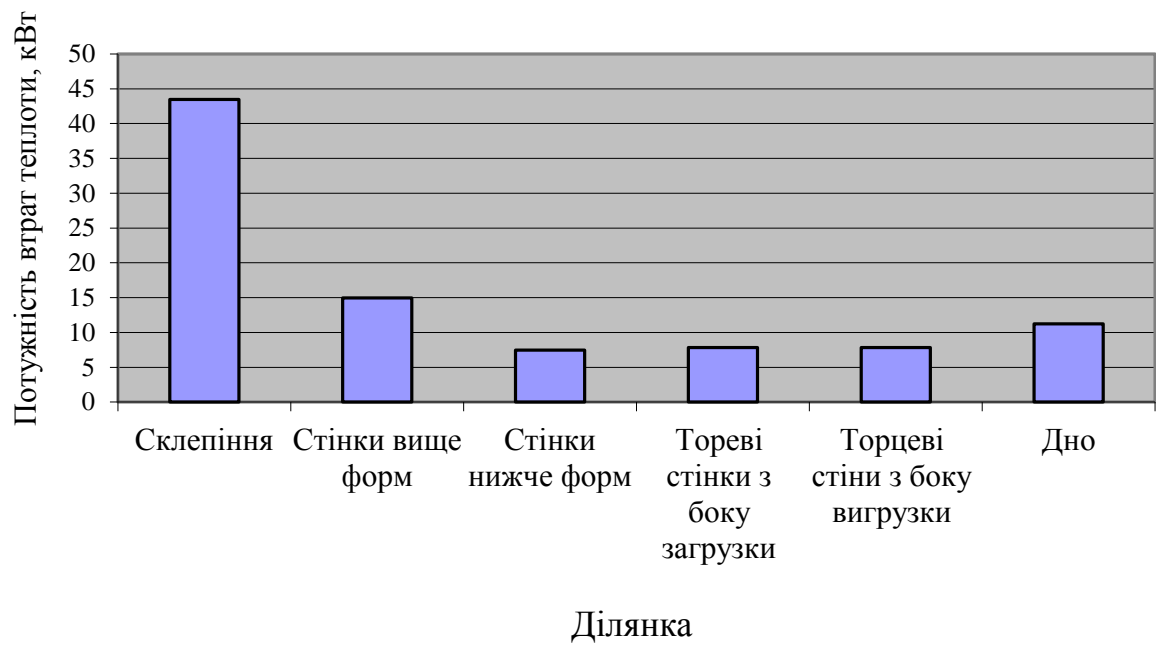


Рис. 5.8. Теплові втрати через огородження печі

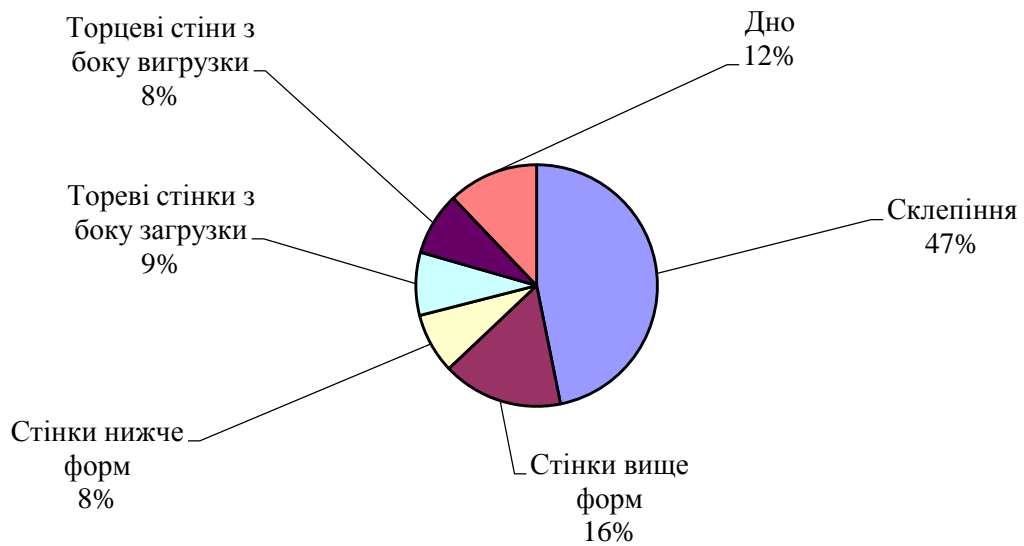


Рис. 5.9. Баланс теплових втрат через огородження печі

5.6 Технічні рішення з промислового впровадження проекту

Дільницю з виробництва піноскла планується облаштувати у типовому цеху з виробництва скляної тари. Цех має габарити 36×60 м. Будівля – 2-х пролітна. Ширина кожного прольоту 18 м. В одному прольоті здійснюється виробництво скляної тари за типовою схемою в даному проекті не розглядається.

5.7 Сировина і її підготовка

Для виробництва піноскла використовуються відходи виробництва листового скла, а також покупний склобій. Можливе також використання власного зворотного склобою основного виробництва машинно-ванного цеху.

Склобій надходить по галереї з окремого приміщення (боємийки), розташованого за межами цеху за допомогою стрічкового транспортеру (1). Він накопичується в бункері для гранульованого скла (2). Потреба в гранульованому склі складає 79,4 кг/год, або 1905,1 кг/добу.

Газоутворювач (вугілля або кокс) зберігається в окремому бункері (3). Потреба в газоутворювачі складає 1,62 кг/год, або 38,9 кг/добу.

Стрічковими транспортерами обидва компоненти шихти надходять у ваговий дозатор (4), і їх подальша суміш у заданій пропорції надходить до шарового млину (5). Загальні витрати шихти становлять 81 кг/год, або 1944 кг/добу.

Шаровий млин має номінальну продуктивність 200 кг/год. Його робота – періодична. Резерв за продуктивністю передбачено для забезпечення необхідної тонкості помелу. Вона складає 100 мкм.

Періодично шаровий млин зупиняється, оператор бере пробу на ситовий аналіз. При задовільній гранулометрії місткість шарового млину вивантажується в бункер для піноутворювальної суміші (6). Потім ця суміш завантажується за допомогою витратного бункеру (7) в металеві форми (8). Маса скляної шихти в одній формі - 4,5 кг. Після завантаження чергової

форми вона піддається вібрації для забезпечення рівномірного розподілу шихти по формі. Для цього передбачена віброплощадка на столі завантаження.

5.8 Піноутворення

Форми з шихтою надходять в піч спінення (9) синхронно по три в одному рядку (рис. 5.10-5.13).

Форми в печі пересуваються по рольгангу – швелерам із жаростійкої сталі. Цикл штовхання форм складає 9-10 хвилин. Маса однієї металевої форми - 45 кг. Маса одного каблука (рольганга) - 6,35 кг. Кількість каблуків, що приходяться на одну форму – 4. Маса каблуків, що приходяться на одну форму - 25,4 кг. Маса металевого оснащення одного ряду - 211,2 кг.

Маса скляної шихти в одному ряду форм - 13,5 кг.

Штовхання форм здійснюється гідроприводом. Задіяні одночасно три гідроциліндри. Робочий тиск масла в кожному циліндрі 210 бар. Діаметр поршня 40 мм. Штовхальне зусилля складає 26900 Н.

Форми для спінювання складаються з двох частин: власне форма з жаростійкого чавуну і її кришка з жаростійкої сталі. Обидві складові частини форми виконані у вигляді усіченої піраміди. В плані форми мають геометрію квадрата. Внутрішня площа дна форми і її кришки має розміри 500×500 мм. Зовнішні габарити форми становлять 590×590 мм.

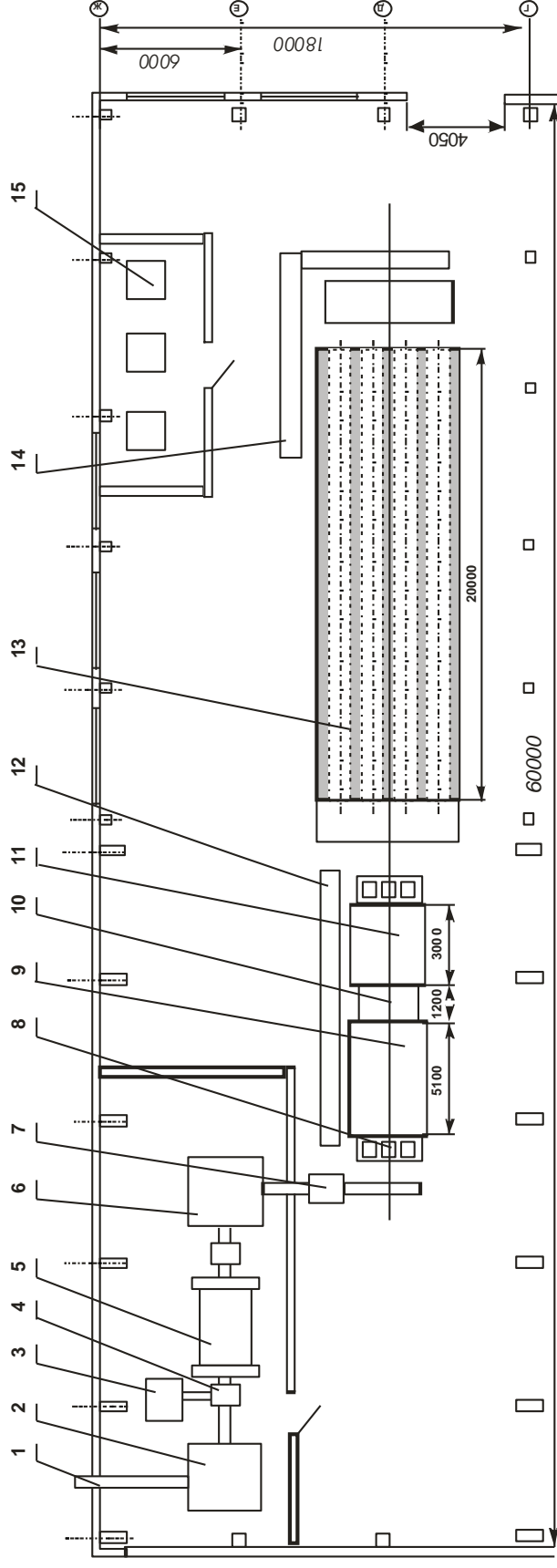


Рис. 5.10. Дільниця з виробництва піноскла

1 - транспортер склобою; 2- бункер для гранульованого скла; 3 - бункер для газотворювача; 4 - ваговий дозатор;
 5 - шаровий млин; 6 - бункер для шихти; 7 - витратний бункер суміші; 8 - форми для спінювання; 9 - піч (зона
 спінювання); 10 - піч (зона охолодження); 11 - піч (зона стабілізації); 12 - зворотний конвеєр для форм; 13 - піч
 для піноскла; 14 - стаціонарний контейнер; 15 - об'єктований резервуар

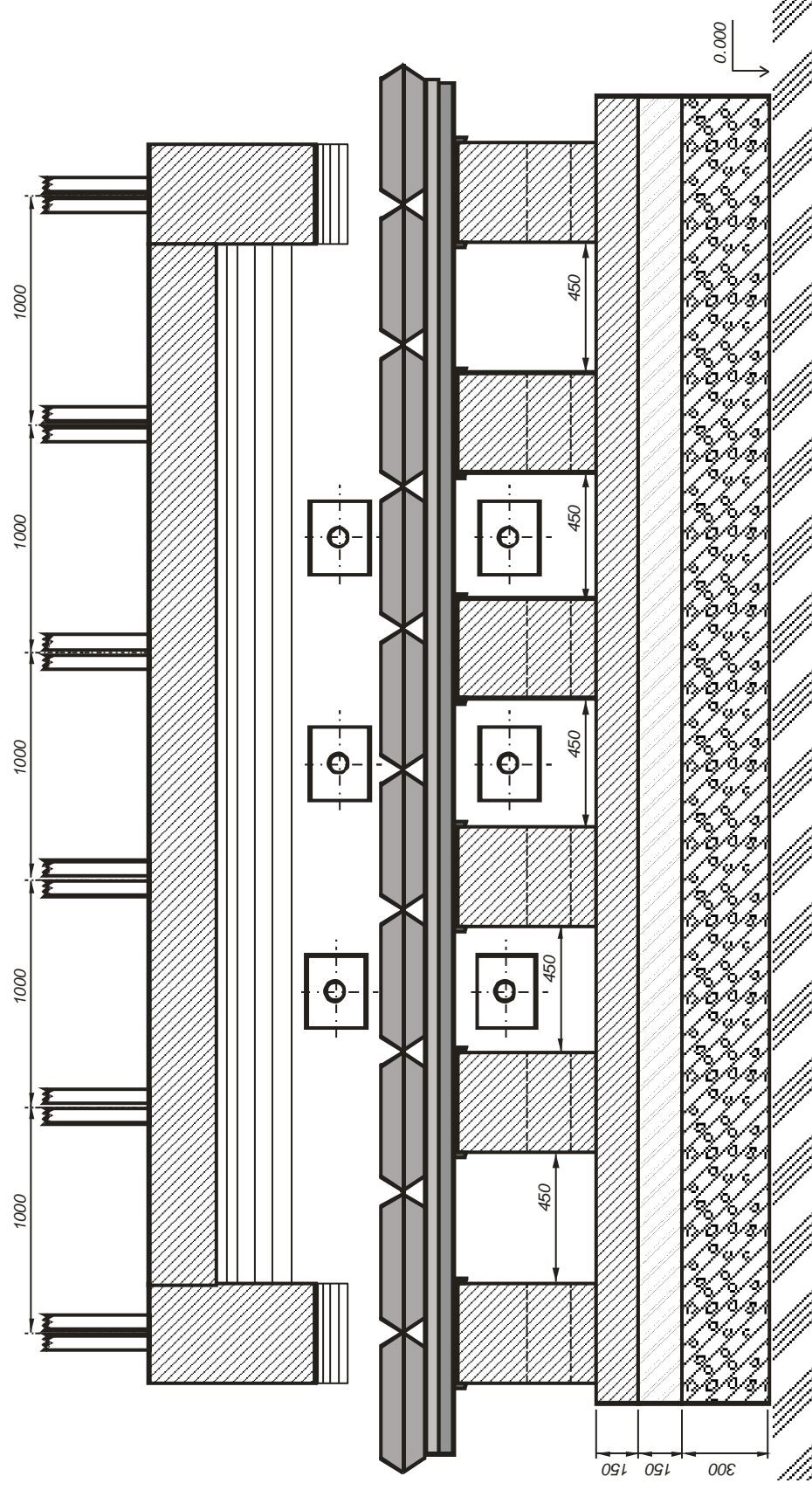
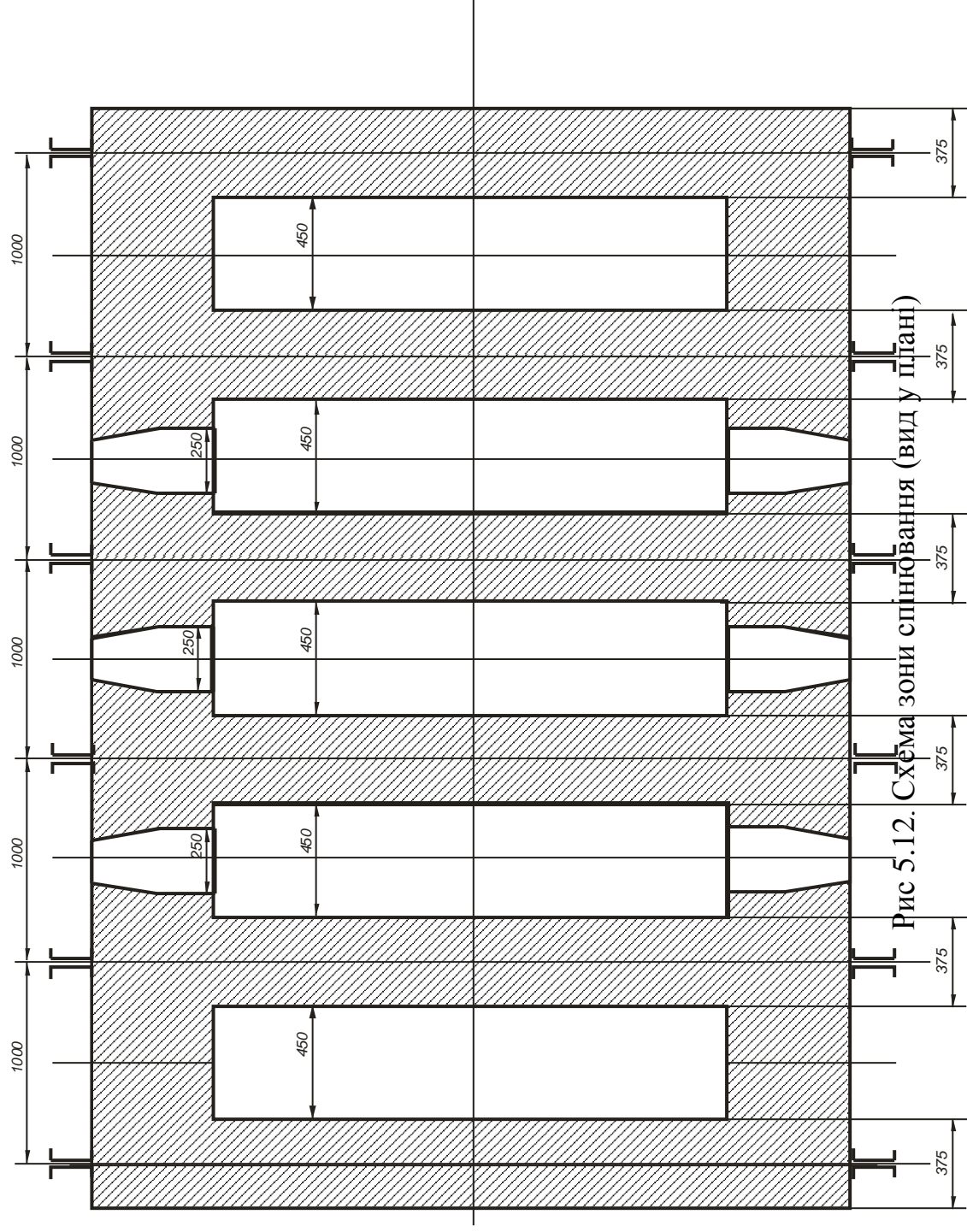


Рис 5.1.1. Схема зони спінування (повздовжній переріз)



Зона спінювання (9) являє собою порожнину, перекриту арковим склепінням. Вся вогнетривка кладка виконана із шамотної цегли. Товщина стін - 500 мм. Товщина склепіння - 250 мм.

Для вільного розміщення трьох форм в одному ряду передбачена ширина тунелю печі – 2000 мм.

Габаритні розміри зони спінювання: довжина - 5,1 м, ширина 3 м, висота порожнини печі (вище рольганга) - 850 мм. Висота порожнини печі (нижче рольганга) - 500 мм. Ширина завантажувальної кишені - 2 м. Висота щілини завантажувальної кишені - 0,1 м.

У подовжніх стінах печі є отвори, у які входять форсунки палива, що утворюють факел вище і нижче форм. Поверх факелу простір спільний для всієї печі. Знизу факел розвивається в камерах, утворених поперечними перегородками з тієї ж шамотної цегли, необхідними для спирання подовжніх направляючих, по яких ковзають форми. Для кращого усереднення температур у нижній частині печі в перегородках є вікна.

Димові гази видаляються через отвір у склепінні в зоні завантаження форм. Таким чином, димові гази рухаються в протитоку стосовно форм, що повинно забезпечити більшу утилізацію теплоти продуктів горіння. Повітря на горіння подається примусово у форсунки разом із паливом. По довжині печі форми (по три в ряд) перебувають послідовно на 9 позиціях. Загальний час перебування форми в печі складає 80 - 90 хвилин.

Температура димових газів (факелу) – 900 °С. Температура (максимальна) спінювання скла – 860 °С. Температура димових газів, що відходять (продуктів горіння) – 800 °С. Температура димових газів, що надходять, із зони стабілізації - 550 °С. Початкова температура металевих форм 300 °С.

Після закінчення піноутворення форми, рухаючись по тому самому рольгангу, виходять у відкритий простір, у так звану зону охолодження (10). Таке стрімке охолодження необхідне для припинення процесу спінювання і фіксації самої піни. В зоні охолодження форми перебувають на двох

позиціях. Термін охолодження складає 18-20 хвилин. Довжина зони охолодження 1200 мм.

Надалі по рольгангу форми прямують у зону стабілізації (11). Конструкція цієї зони така сама, що і зони спінювання. Різниця полягає лише в тому, що форми перебувають лише на 5-ох позиціях. Довжина зони стабілізації складає 3000 мм. Час перебування форм в зоні стабілізації 45÷50 хвилин. В зоні стабілізації, на відміну від зони спінювання передбачено 2 пари пальників. Температурний режим перебуває на рівні 550÷600 °С.

На виході із зони стабілізації форми розкриваються, з них вилучаються блоки піноскла. Операції виконуються вручну. Форми переставляються на зворотний пластинчатий конвеєр (12) і прямують до зони завантаження.

5.9 Відпал піно-блоків і кінцеві операції

Блоки піноскла – великогабаритні вироби, їх товщина складає 100÷120 мм і для відпалу необхідно біля 8 годин. Використання для відпалу традиційних для сучасного склоробства тунельних печей безперервної дії було б недоцільним, оскільки довжина печі була б необхідною понад 40 метрів. Для цього в проекті запропоновано використання печей періодичної дії (13). Фактично це є 4 печі, які скомпоновані в один агрегат. Кожна піч – це незалежний один від одного пічний канал. Кожний канал має нахил вбік вивантаження. Блоки піноскла, після їх вилучення з форм, підйомниками піднімаються на площадку завантаження в піч відпалу (рис.5.14.) Тут вони завантажуються в дротові кошики у 4 яруси. Кошики причіплюються до люлькового конвеєру, і самочинно скочуються один за одним завдяки ухилу вбік зони вивантаження. Робочі канали з обох боків мають камери для шлюзування для уникнення втрат теплоти під час завантаження і вивантаження.

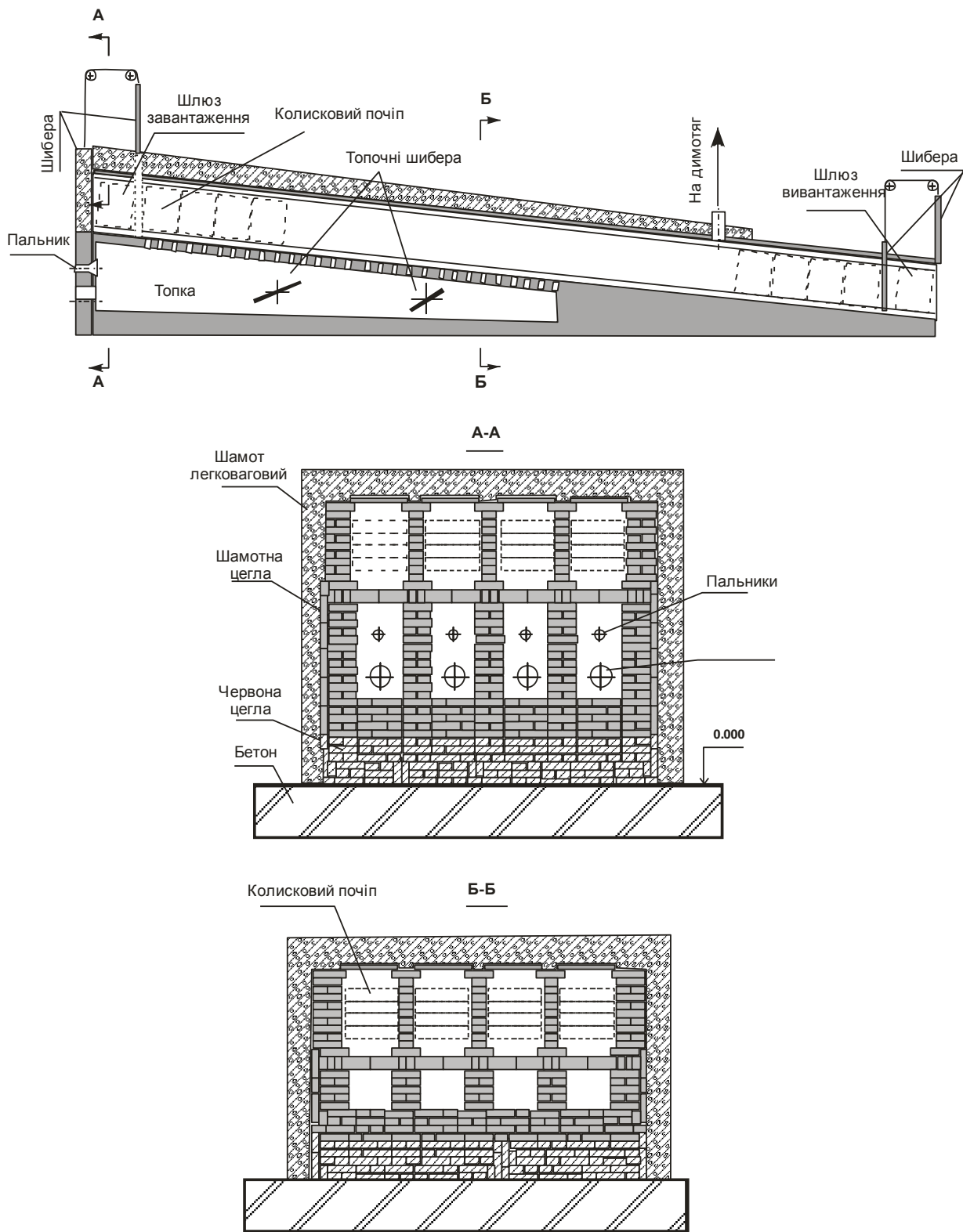


Рис. 5.14. Піч відпалу

В нижній частині кожної секції передбачені порожнини, які простягаються на певну довжину кожної секції. Ці канали являють собою топки. З торцевої стінки таких каналів встановлюється пальник. Димові гази

за допомогою шиберів розподіляються по довжині топки і через решітчастий під каналу відпалу належним чином обігрівають блоки.

Кожна секція печі відпалу працює у часі за наступними циклами:

1. Завантаження печі (6 годин). Під кожні 10 хвилин відкривається для завантаження 3-х чергових виробів. Температура в печі підтримується 550 °С.

2. Відпал виробів (8 годин). Температура підвищується приблизно до 590 °С і потім повільно знижується до 450 °С.

3. Пришвидшене охолодження (3 години). Починається з відкривання дверцят. Температура швидко знижується до 300 °С.

4. Вивантаження печі (термін 1 година).

5. Розігрів печі (термін 6 годин). Температура поступово підвищується до 600 °С.

Таким чином увесь цикл роботи однієї секції печі потребує 24 години (рис. 5.15). Робота 4-х секцій синхронізована. Циклограма роботи 4-х секцій наведена на рис.5.16. Як бачимо, завантаження печі відбувається безперервно протягом доби. Вивантаження робиться епізодично через кожні 6 годин протягом 1 години.

Готові відпалені блоки стрічковим конвеєром (14) надходять до відділку нарізання, де на верстатах (15) з алмазними кругами обпилюються до заданих розмірів.

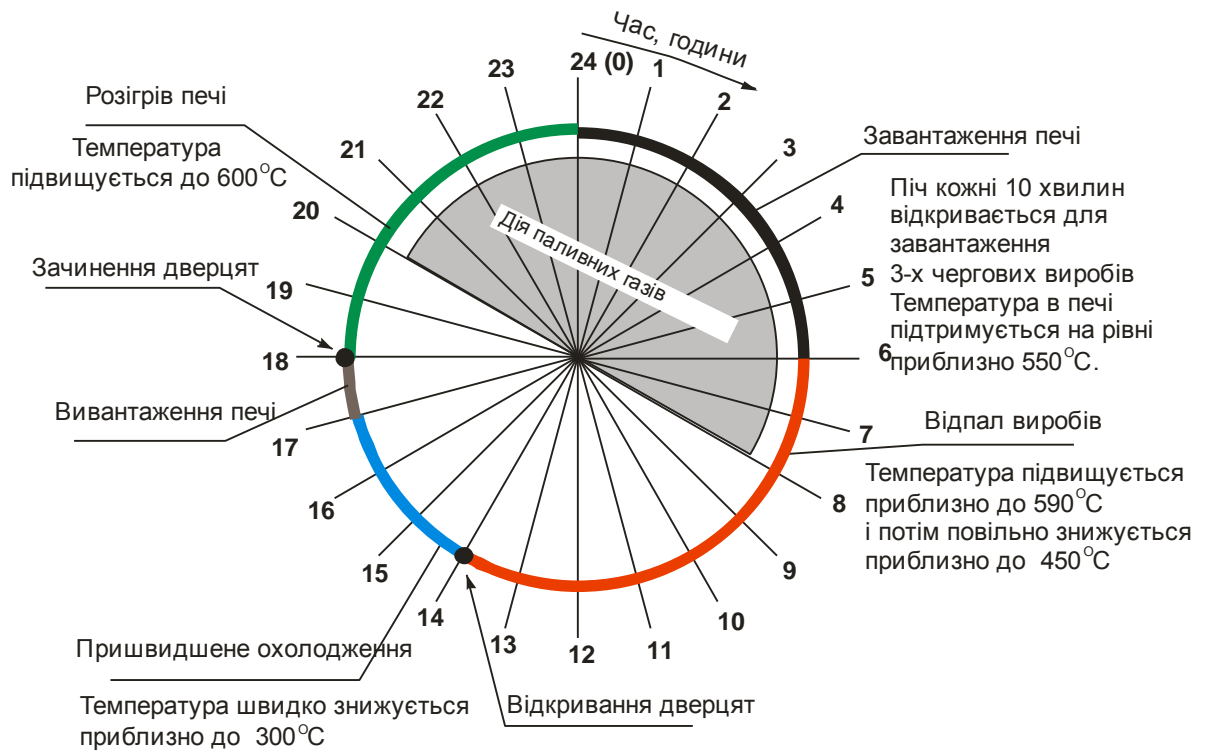


Рис. 5.15. Циклограма роботи однієї секції

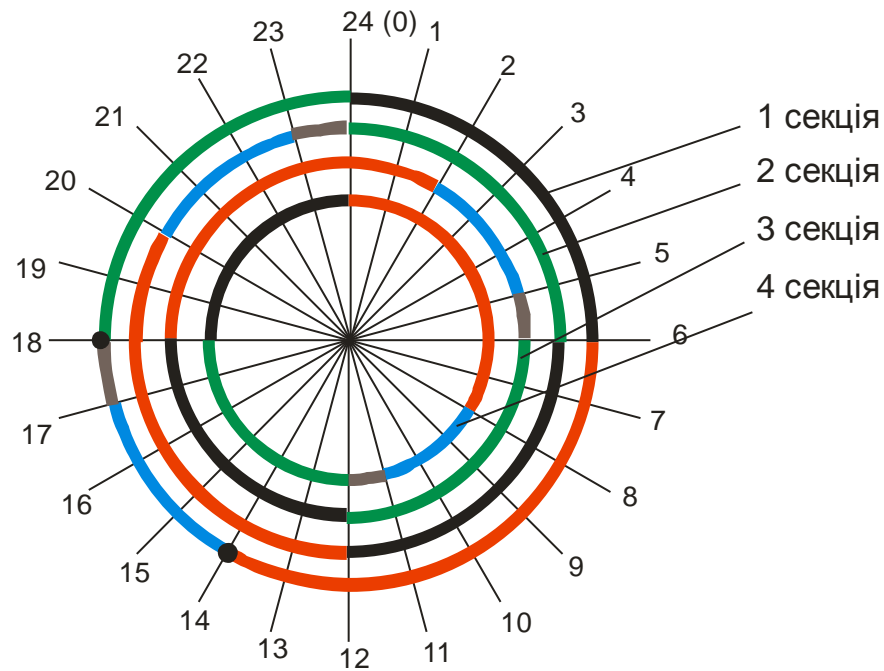


Рис. 5.16. Синхронізація роботи 4-ох секцій

6 КОНТРОЛЬ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИРОБНИЦТВА ПІНОСКЛА ТА АВТОМАТИЧНЕ РЕГУЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ

Сучасна хімічна промисловість характеризується складністю, великою потужністю технологічних апаратів і великою кількістю різних параметрів, від яких залежить перебіг хіміко-технологічних процесів. Усе це зумовлює неможливість проведення сучасних технологічних процесів без їх часткової або повної автоматизації.

Автоматизація приводить для поліпшення головних показників ефективності виробництва: збільшення кількості, поліпшення якості й зниження собівартості виробленої продукції. Впровадження автоматичних пристроїв забезпечує високу якість продукції, скорочення браків та відходів, зменшення витрат сировини та енергії, зменшення чисельності основних робітників, зниження капітальних витрат на будівництво будівель, подовження міжремонтних строків експлуатації обладнання.

Складність і висока швидкість протікання технологічних процесів у хімічній промисловості, їх чутливість до порушень режиму, а також підвищені вибухо- та пожежонебезпечність і шкідливість умов роботи спричиняють підвищену увагу до питань автоматизації хіміко-технологічних процесів. Автоматичні контроль та керування технологічними процесами забезпечують високу якість продукції, раціональне використання сировини та енергії, подовження термінів міжремонтного періоду роботи устаткування, підвищення обсягів випуску й якості продукції, зменшення чисельності технічного персоналу [48].

Для надійної експлуатації обладнання, підтримки оптимальних технологічних параметрів, використання обладнання на повну потужність, застосовують системи автоматичного регулювання та контролю, що дозволяють підвищити безпеку роботи устаткування і поліпшують умови роботи персоналу.

6.1 Опис технологічної схеми підготовки піноутворюючої суміші

Технологічна схема процесу складається з бункерів в яких знаходяться склобій та газоутворювач. З бункерів подачі (1), (2) склобій та газоутворювач проходять на помел в (3) шаровий млин. У шаровому млині відбувається одночасно помел на більш мілку фракцію та змішування склобою з газоутворювачем. Шаровий млин робить 1 об/с. Потім суміш потрапляє до бункера (4) та по конвеєру (5) потрапляє на дозування.

6.2 Аналіз технологічного процесу як об'єкта автоматизації

Основні параметри, що вимагають контролю при підготовці піноутворювача – це рівень завантаження бункерів та витрати сировини, що подається у шаровий млин, а також швидкість його обертання. Дані параметри зазначені в табл. 6.1.

Таблиця 6.1 – Параметри контролю та керування виробництвом

№ пп	Назва стадії процесу (технологічний об'єкт), місце заміру параметра	Назва контрольованого чи регульованого параметра	Норми технологічного режиму та допустимі відхилення	Вимоги до рівня автоматизації (контроль, регулювання, сигналізація)
1	2	3	4	5
1	Бункер склобою	Рівень	Верхній рівень – 5м Нижній – 0,5 м	Контроль, сигналізація
2	Бункер склобою	Витрата матеріалу	80 кг/год	Контроль, регулювання
3	Бункер газоутворювача	Рівень	Верхній рівень – 5м Нижній – 0,5 м	Контроль, сигналізація
4	Бункер газоутворювача	Витрата матеріалу	2 кг/год	Контроль, регулювання
5	Шаровий млин	Швидкість обертання	$1 \pm 0,2$ об/сек	Контроль, регулювання

6	Бункер піноутворювача	Рівень	Верхній рівень – 5м Нижній – 0,5 м	Контроль, сигналізація
7	Бункер піноутворювача	Витрата матеріалу	90 кг/год	Контроль, регулювання
8	Конвеєр	Швидкість обертання	$0,5 \pm 0,01$ об/сек	Контроль, регулювання

6.3 Опис розробленої схеми автоматизації

Для забезпечення нормальної роботи усього технологічного устаткування, збільшення продуктивності виробництва, підвищення якості продукту, стабілізації, контролю та реєстрації технологічних параметрів, а також мінімізації можливих помилок технологічного персоналу розроблено схему автоматизації, що призначена вирішувати всі ці завдання. Схема автоматизації включає низку контурів автоматичного контролю та регулювання режимних параметрів технологічного процесу.

Контури контролю рівня в бункерах сировинних матеріалів (1), (4), (6) складається з вібраційного рівнеміра (1-1, 3-1, 6-1) та сигналізатора рівня сипучих матеріалів (1-2, 3-2, 6-2).

Для контролю та регулювання витратою матеріалу на шаровий млин контури (2), (5) було встановлено витратомір (2-1) (4-1), вторинний показувальний та реєструючий прилад (2-2) (4-2), регулювальний блок (2-3) (4-3), та виконавчий механізм (2-4) (4-4).

Для контролю та регулювання швидкості обертання шарового млина (7) було встановлено первинний перетворювач електронного дистанційного тахометра (5-1), який передає сигнал на вторинний перетворювач електронного дистанційного тахометра (5-2) далі сигнал йде на автоматичний показувальний і реєструвальний вторинний прилад (5-3), а потім на мікропроцесорний регулятор (5-4), який передає сигнал на магнітний пускач МР1.

Для контролю та регулювання швидкості конвеєра 12 було встановлено первинний перетворювач електронного дистанційного тахометра (8-1), який передає сигнал на вторинний перетворювач електронного дистанційного тахометра (8-2) далі сигнал йде на автоматичний показувальний і реєструвальний вторинний прилад (8-3), а потім на мікропроцесорний регулятор (8-4), який передає сигнал на магнітний пускач МР2.

Шаровий млин (3), конвеєр (5) в дію приводяться за допомогою електродвигуна. Для дистанційного керування ними застосовуються магнітні пускачі відповідно МП1, МП2.

Електродвигуни вмикаються за допомогою кнопок SB1, SB3. Лампи сигнальні HL1, HL3 (зеленого кольору) сигналізують, що електродвигун є ввімкненим. Вимикаються електродвигуни за допомогою кнопок SB2, SB4, а лампи HL2, HL4 (червоного світла), сигналізують про те, що електродвигуни вимкнені. Також по місцю знаходяться кнопки запобіжного відключення KB1, KB2.

6.4 Специфікація устаткування, виробів та матеріалів

Специфікація на описані прилади наведена в додатку А.

7 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ НА ВИРОБНИЦТВІ.

ПИТАННЯ ЕКОЛОГІЇ

Технологічна частина подає інформацію, що в даному виробництві використовуються шкідливі та небезпечні речовини, теплова енергія та енергія хімічних реакцій, а також пожежонебезпечні матеріали й електроенергія.

Всі проектні рішення прийняті з урахуванням вимог охорони праці на базі аналізу ШНВФ. Розроблено заходи безпечних умов праці.

7.1 Виявлення та аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів (ШНВФ) на проектному об'єкті.

Заходи з охорони праці

7.1.1 Повітря робочої зони

Згідно з ДСН 3.3.6.042-99 категорія робіт відноситься до середньої важкості II б.

Таблиця 7.1 – Гігієнічні норми метеорологічних умов у приміщенні проєктованого цеху

Категорії робіт	Період року	Температура, °C		Відносна вологість повітря, %		Швидкість руху повітря, м/с	
		Оптимальне значення	Допустиме значення	Оптимальне значення	Допустиме значення	Оптимальне значення	Допустиме значення
Середньої тяжкості II б	Теплий	20-21	18-24	60-40	65	0,3	0,4
	Холодний	17-19	16-22	60-40	75	0,5	0,4

В проектуваному цеху нормальні метеорологічні умови забезпечуються за рахунок ряду заходів: автоматизації і механізації важких і трудомістких робіт; теплоізоляції й раціональному розміщенню устаткування, агрегатів, комунікацій та інших джерел, що випромінюють на робочих місцях тепло; вологому прибиранню приміщень [49].

В робочій зоні персонал захищений від шкідливих речовин засобами індивідуального захисту: спецодягом типу «РГ», респіраторами. Біля входу в цех установлені теплові завіси, що попереджають переохолодження персоналу.

Таблиця 7.2 – Коротка санітарна характеристика цеху, що проектується

Назва виробничої ділянки	Шкідливі речовини, що виділяються	Група шкідливої речовини, характеристика шкідливої дії	ГДК шкідливої речовини у повітрі робочої зони, мг/м ³	Клас небезпечності	Засоби індивідуального захисту: тип, марка	Засоби долікарняної допомоги	Методи контролю вмісту шкідливих речовин у повітрі робочої зони
1	2	3	4	5	6	7	8
Цех	CO ₂ SO ₃	Подразнюючі, неприємний смак у роті, подразнює слизові оболонки	20 10	IV IV	Ізольовані протигази, респіратор та спецодяг типу «РГ»	Шкіру та слизові оболонки промивають водою або 2%-ним розчином соди не менше 15 хв	Універсальний газоаналізатор УГ-2

Проектом передбачена загальнообмінна і місцева витяжна система вентиляції і комбінована вентиляція, аерація. Схема вентиляції «зверху – вгору». Контроль повітрообміну – $E=300$ кВт/м. Кратність повітрообміну складає 5 годин⁻¹. Передбачені проектом, герметизація устаткування і її аспірація, установка витяжних парасольок на ділянці заготівлі шихти. З метою зниження запилення проводять вологе прибирання приміщень промисловими пилососами.

Для підтримки сприятливих умов в цеху прийнято проектом вентиляцію та аспірацію, відділення забезпечують автоматами для води. У холодну пору року передбачено центральне опалювання робочих приміщень.

Розрахунок аерації цеху

Визначаємо температуру повітря, верхньої зони приміщення:

$$t_{\text{уд}} = t_{\text{нар}} + \frac{t_{\text{нар}} - t_{\text{р.з.}}}{m},$$

де $t_{\text{нар}}$ – температура повітря ззовні,

для Києва в теплий період $t=24^{\circ}\text{C}$

$t_{\text{ВН}}$ – температура внутрішнього повітря; $t_{\text{ВН}}=25^{\circ}\text{C}$;

$t_{\text{р.з.}}$ – температура повітря, що надходить у робочу зону;

$$t_{\text{р.з.}} = t_{\text{нар}}$$

$$t_{\text{р.з.}} = 24^{\circ}\text{C}$$

m – коефіцієнт, приймаємо рівним 0,53.

Визначення щільності повітря:

$$\rho = \frac{353}{t+273} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$24 + \frac{25-24}{0,53} = 25,9^{\circ}\text{C}$$

$$\frac{353}{24+273} = 1,188 \text{ кг/м}^3$$

$$\frac{353}{27+273} = 1,176 \text{ кг/м}^3$$

Розподілений тиск визначаємо за формулою:

$$\Delta\rho_{1.2} = h \times (\rho_{\text{нар}} - \rho_{\text{уд}}),$$

де h - відстань між осями прорізів; $h = 10$ метрів

$$\Delta\rho_{1.2} = 10 \times (1,188 - 1,176) = 0,12 \text{ кг/м}^2$$

$$\Delta\rho_1 = 0,2 \times 0,12 = 0,024 \text{ кг/м}^2$$

B – частина різниці тисків, що використовується на прохід повітря через приточні прорізи, $B=0,4$

$$\Delta\rho_2 = 0,4 \times 0,024 = 0,0096 \text{ кг/м}^2.$$

Визначаємо площу прорізів у стіні $F_{\text{прит}}$ і площу прорізів ліхтаря $F_{\text{фон}}$

$$F_{\text{прит}} = \frac{G_{\text{прит}}}{3600 \sqrt{\frac{2 \times g \times \rho_{\text{нар}}}{\xi_1} \times \Delta \rho_1}}$$

$$F_{\text{прит}} = \frac{4200}{3600 \sqrt{\frac{2 \times 9,8 \times 1,188}{3,7} \times 0,024}} = 30 \text{ м}^2$$

$$F_{\text{прит}} = \frac{G_{\text{уд}}}{3600 \sqrt{\frac{2 \times g \times \rho_{\text{нар}}}{\xi_1} \times \Delta \rho_2}}$$

$$F_{\text{прит}} = \frac{30000}{3600 \sqrt{\frac{2 \times 9,8 \times 1,176}{4,1} \times 0,096}} = 11,34 \text{ м}^2 ,$$

де $G_{\text{прит}}$ – кількість повітря, що повинне надходити в приміщення; $G_{\text{уд}}$ – кількість повітря, що видаляється.

В режимі реального часу за допомогою пиломіру та газоаналізатора буде проводитись контроль вмісту повітря робочої зони температури, відносної вологості, тиску та вмісту кисню у повітрі застосовуються прилади контролю мікроклімату КПМ. Для контролю теплового випромінювання застосовується парний термометр. Відносна вологість повітря в лабораторних умовах визначається за допомогою стаціонарного (психометр Августа), а також аспіраційного психометра М-34. Для спостереження за швидкістю руху повітря в приміщенні цеху встановлені чашкові анемометри [50].

7.1.2 Виробниче освітлення

Згідно ДБН В.2.5-28-06 роботи в цеху за зоровими умовами відносяться до розряду VIII а. Проектом прийнято, природне, штучне і комбіноване освітлення.

Природне освітлення є боковим.

Штучне освітлення представлено системою загального рівномірного освітлення, за якої світильники розміщують у верхній зоні приміщення.

У проекті підприємства розроблена: аварійна, евакуаційна і ремонтна системи штучного освітлення [51].

Таблиця 7.3 – Санітарні норми параметрів освітлення

Розряд і підрозряд зорових робіт	Освітленість, лк		КЕО 1	
	Штучне освітлення		Природне освітлення	Суміщене освітлення
	Комбіноване	Загальне	Верхнє і бічне	Верхнє і бічне
VIII а	700	400	1	0,7
IV б	500	200	4	24

Для штучного освітлення застосовується люмінесцентні лампи низького тиску типу ЛБ. Згідно ДБН В.2.5-28-06, прийнята напруга 220 В. При відключенні робочого освітлення передбачено аварійне освітлення.

Місцеве освітлення робочих місць здійснюється світильниками типу ПВЛ-6.

Стіни і стелі забарвлені в світлі тони, внутрішні поверхні огорож і небезпечні елементи механізмів – в червоний.

Освітлення контролюється за допомогою люксметра Ю-116 або Ю-117 не менше одного разу на рік, а також після ремонту освітлювальних пристроїв.

7.1.3 Виробничий шум та вібрації

Виробничий шум виникає в результаті роботи технологічного устаткування на дільниці заготовки шихти. Шуми носять постійний характер. Допустимий рівень звуку у виробничих приміщеннях, згідно ДСН 3.3.6 037-99 - 80 дБА.

Джерелом вібрації є насоси, преси, відсікачі.

Таблиця 7.4 – Допустимі рівні вібрації на робочих місцях

Вид вібрації	Октавні смуги з середньгеометричними частотами, Гц					
	2	4	8	16	31,5	63
На постійних робочих місцях в виробничих приміщеннях	1,3/108*	0,4/99	0,22/93	0,2/92	0,2/92	0,2/92

* У чисельнику представлені середньоквадратичні значення вібрації, $\text{м/с} \times 10^{-2}$; у знаменнику – логарифмічні рівні вібрації, дБА.

Для захисту від виробничого шуму на підприємстві передбачені звукоізоляційні пристрої – перегородки і екрани, які встановлюють між джерелом шуму і робочим місцем засоби індивідуального захисту – навушники, беруші.

Для зниження рівня вібрації використовуються сталеві пружинні амортизатори.

Для вимірювання і аналізу шуму прийнято проектом шумоміри Шум-1М, ШМ-1, частотні аналізатори. Для контролю вібрації прийнято проектом віброметр ВМ-1 з октавним фільтром ФЭ-2, прилад ВШВ-003 [52].

7.1.4 Електробезпека

Ураження людей електричним струмом може виникнути в результаті дотику до відкритих струмоведучих частин, до струмопровідних неструмоведучих елементів устаткування, що опинилися під напругою в результаті порушення ізоляції, а також ураження кроковою напругою та через електродугу.

Заводське електроустаткування живиться від трифазної чотирьохпровідної електромережі змінного струму промислової частоти з глухозаземленою нейтраллю напругою 380/220 В. Для змінного струму з

частотою 50 Г гранично припустимі значення напруги дотику й струму, що проходить через тіло людини, при аварійному режимі $I_{\text{л}} = 6 \text{ мА}$, $U_{\text{дот}} = 2 \text{ В}$. Згідно з ГОСТ 12.1.038-92 порівнюють розрахункове значення із гранично допустимим значенням струму:

$$I_{\text{л}} = \frac{U_{\text{ф}} \cdot 10^3}{R_{\text{л}} + R_0}, \text{ мА};$$

де $R_{\text{л}}$ – опір тіла людини, Ом;

R_0 – опір нейтралі заземлення, Ом;

$U_{\text{ф}}$ – фазова напруга, В.

$$U_{\text{д}} = I_{\text{л}} \cdot R_{\text{л}} \cdot 10^3, \text{ В};$$

$$R_{\text{л}} = 2 \dots 4 \text{ кОм};$$

$$R_0 = 4 \text{ Ом};$$

$$I_{\text{л}} = \frac{220 \cdot 10^3}{4000 + 4} = 0,05 \text{ А};$$

$$U_{\text{д}} = 0,05 \cdot 4000 = 220 \text{ В}$$

Для забезпечення безпеки роботи, в діючих електроустановках передбачається комплекс заходів:

- застосування ізоляції частин електроустаткування. Відкриті струмоведучі частини електроустаткування захищені сіткою;
- застосування занулення устаткування;
- захист електропроводки від механічних пошкоджень прокладкою проводів в трубах, схованої у металорукавах;
- установка електроустаткування відповідно до умов навколишнього середовища; закриті пилонепроникні електродвигуни;
- захисні засоби, діелектричні рукавички, інструменти з ізолюючими рукоятками, показчики напруги, діелектричні калоші, що ізолюють підставки;
- регулярний огляд і своєчасний ремонт електроустаткування.

7.1.5 Безпека технологічних процесів і обслуговування устаткування

На підприємстві знаходитиметься устаткування з рухомими деталями, до якого відносяться млини, змішувачі. До устаткування, відносно якого висуваються підвищені вимоги з виробничої безпеки, відносяться теплові агрегати, що працюють на мазутному паливі, тому що при горінні виділяється СО.

Для усунення небезпеки отримання травм рухомі частини устаткування захищені сітчастими металевими огорожами. Шаровий млин обладнаний блокуванням, що автоматично відключає привід з подачею звукового сигналу при заклинюванні і перевантаженні електродвигуна. Стрічкові конвеєри захищені від приводних і натяжних барабанів, які блокуються приводом. На підприємстві для захисту робітників від деталей, що обертаються, і частин устаткування застосовується сітчасті стаціонарні огорожі.

При експлуатації вантажопідійомних машин не передбачено піднімати вантажі, маса яких перевищує допустиму вантажопідійомність, одночасно підіймати вантаж і людей, підіймати вантаж в нестійкому положенні.

Трубопроводи подачі теплоносія захищені і ізольовані, щоб виключити опіки робітників. Завантажувальні і розвантажувальні кінці тунелів оснащені звуковою і світловою сигналізацією.

Рухомі частини розташовані нижче 2 м від підлоги і захищені захисними сітками, кожухами. Для переходу передбачено перехідні мости. Шлях руху транспортних засобів захищений.

Піч оснащена системою автоматичного відключення подачі палива при відхиленні одного з параметрів: тиску, напруги в мережі, тиску повітря, розрідження в каналі печі.

7.2 Пожежна безпека

Найменування ділянок, приміщень, зовнішніх ділянок і матеріалів	Речовини, що використовуються у виробництві, хім. склад	Агрегатний стан речовини при нормальних умовах	Горючість, займистість	Показники пожежо-, вибухонебезпечності			Вибухонебезпечні суміші з повітрям		Вогнетушильні засоби
				Температура спалаху	Температура запалення	Температура самозапалення	Категорія	Група	
Ділянка спінювання, відпалу	Мазут	рідкий	горючий	80-112°C		112 °C			Пінний вогнегасник (ВХП-10), пісок
	Дизельне паливо	рідкий	горючий	35-80 °C		200 °C			Пінний вогнегасник (ВХП-10)
	Машинне масло	рідкий	горючий	200 °C	160-191°C				Пінний вогнегасник (ВХП-10)

На проектованій ділянці заводу горючими елементами є дерев'яні двері, вікна, шафи з одягом, також може мати місце спалах горючого.

Таблиця 7.5 – Показники пожежо- та вибухонебезпечності

Джерелами спалаху можуть бути: іскри електрозамикання, заряди статичної електрики, перегрів електроустаткування. Причинами загоряння може бути руйнування кабелю, проводки, як наслідок короткого замикання.

У таблиці 7.5 наведені показники пожежо- і вибухонебезпечності речовин і матеріалів, і класифікація цеху за показниками пожежо- та вибухонебезпечності.

Проектом передбачені наступні заходи пожежної безпеки: встановлені внутрішні протипожежні водопроводи, пожежні крани згідно СНіП 2.09.02-

85; пінні вогнегасники ВХП-10; є ємності з піском, пожежні щити; вмонтована сигналізація з датчиками РП-50 і СТХ-174; захист ізоляції від теплової і механічної дій; заходами захисту від статичної електрики є: заземлення виробничого обладнання, резервуарів, трубопроводів; нейтралізація шляхом зволоження або іонізації повітря. Для захисту від прямого удару блискавки в будівлю, передбачено систему стрижньових блискавковідводів. При проектуванні цеху передбачені міри розширення, що запобігають вогню: розділ спорудження протипожежними перекриттями на відсіки, обладнані протипожежні перешкоди у вигляді гребнів, козирків, бортиків, обладнані протипожежні двері. На технічному устаткуванні (піч) передбачене застосування запобіжних пристроїв (мембран, клапанів). Вони спрацьовують при підвищенні тиску понад установлені межі. Всі електроустановки захищені автоматичними пристроями від струмів короткого замикання [53].

На газовикористовуючих апаратах установлюються КВП, для виміру наступних параметрів: тиску газу в пальниках після останнього пристрою, що відключає тиск повітря в повітропроводі до пальників після останнього шиберу; розрідження й температуру в печі.

Оглядові люки оснащені заслінками, що щільно закриваються, щоб уникати викидів полум'я.

7.2.1 Аналіз безпеки об'єкта

Аварійна ситуація - стан потенційно небезпечного об'єкта, що характеризується порушенням меж та умов безпечної експлуатації, але не перейшов в аварію, при якому всі несприятливі впливи джерел безпеки на персонал, населення та навколишнє середовище утримуються у прийнятних межах за допомогою відповідних технічних засобів, передбачених проектом [54] .

На підприємстві наявні такі небезпечних речовини як: машинне масло, дизельне паливо, мазут, пропан, які відносяться до вибухопожежонебезпечних речовин. Небезпечним об'єктом на підприємстві є газорозподільний пункт.

Прогнозуємо сценарій виникнення і розвитку можливих аварій, що призводять до реалізації потенційних небезпек.

На підприємстві можливий вибух пропану в газорозподільному пункті.

1. Відстань від цеху до міста аварії (вибуху) – 850 м

2. Маса пропану – 310 т

3. Характеристики елементів цеху: будівля – зі збірного залізо бетону верстати – важкі, кабельні лінії – наземні контрольно-вимірювальна апаратура – наявна границі вогнетривкості несучих стін – 2 год, границі вогнетривкості перегородок – 0,25 год

4. Категорія виробництва з пожежної безпеки – Б

5. Щільність забудови об'єкту – 30%

Розрахункова частина: 1.1. Зона I : $r_1 = 118$ м;

1.2. Зона II: $r_2 = 201$ м;

Висновок: об'єкт опиниться за межами цих зон, тобто у зоні повітряної ударної хвилі (зона III)

1.3. $\Delta P_{\text{ф}} = 23$ кПа

1.4.1. Ступінь руйнування будівлі – середня

Характеристика руйнувань будівлі: Руйнування даху, легких внутрішніх перегородок, в капітальних стінах з'являються тріщини

1.4.2. Ступінь руйнування верстатів – слабкі

Характеристика руйнувань промислового обладнання: Пошкодження окремих елементів обладнання, важелів управління, вимірювальних приладів

1.4.3. Ступінь руйнування контрольно-вимірювальної апаратури – сильні

1.4.4. Ступінь руйнування кабельних ліній – слабкі

2.1. Ступінь ураження людей – від прямої дії - легкі

2.2. Характеристика уражень людей: легка контузія організму, часткова втрата слуху, вивихи кінцівок.

3.1. Ступінь вогнестійкості – III ступінь вогнестійкості

3.2. Очікувана пожежна обстановка для виробництва категорії пожежної небезпеки Б, ступеня вогнестійкості будівель – III, при надмірному тиску 23 кПа і щільності забудови більше 30% можна очікувати окремі пожежі, що швидко перетворюються у суцільні, і супроводжуються вибухами виробничого устаткування.

4.1. Безпечна кількість вибухової речовини - менше 75 т

4.2. Визначаємо безпечну кількість пропану для уникнення будь-яких руйнувань, тобто контрольно-вимірювальна апаратура вціліє, якщо кількість пропану буде менше 18 т

5. Висновки: На відстані 850 м від цеху стався вибух пропану, що призвело до руйнувань будівлі, елементів цеху, постраждали люди. В першу чергу треба сповістити про НС, провести евакуацію персоналу, надати першу медичну допомогу.

Серед рекомендацій, спрямованих на зменшення заподіяної шкоди та уражень людей, можуть бути такі: 1) укріпити будівлю установленням додаткових колон, ферм, підкосів; 2) верстати надійно закріпити на фундаменті, установити захисні навіси або ковпаки; 3) кабельні лінії прокласти під землею; 4) створити 50% запас контрольно-вимірювальної апаратури; 5) установити на вікнах захисні металеві сітки, щоб розбите скло не потрапляло в приміщення цеху; 6) установити і регулярно контролювати стан вогнегасників та інших протипожежних систем; 7) порушити питання перед відповідними органами про зменшення запасу вибухонебезпечної речовини до безпечної кількості.

РОЗДІЛ 8. СТАРТАП-ПРОЕКТ

8.1 Резюме стартапу, основні економічні показники

Бізнес-ідея даного проекту – це виготовлення теплоізоляційних пакетів із залишків піноскла, що є невід’ємною частиною в процесі промислового виготовлення піноскла.

Метою стартапа є розробка, впровадження та виведення у серійне виробництво теплоізоляційного утеплення малих архітектурних форм.

Тема: виготовлення та встановлення теплоізоляційних пакетів з піноскла для будівель дачного типу, та будівель які відносяться до малих архітектурних форм .

Суб’єктами замовлення є власники різноманітних малих архітектурних форм, включаючи власників приватного майна для худоби і домашніх улюбленців і державні замовлення для утеплення зупинок громадського транспорту.

Об’єктом дослідження є ринок, а саме попит на даний вид продукції, легкість реалізації ідеї, технічні та технологічні характеристики теплоізоляційного матеріалу, його цільова придатність.

Таблиця 8. 1 – Резюме стартап-проекту

Показник	Характеристика
1. Сутність ідеї	Утеплення засипкою із піноскла малих архітектурних форм
2. Наявність аналогів або прототипів ідеї	Засипка з керамзиту (має більшу ціну в порівнянні з засипкою піноскла)
3. Основна потреба, яку задовольнить реалізований стартап	Утеплення, збереження, підтримка температурного режиму за нормами
4. Ступінь розробленості технології реалізації	75%
5. Класифікація продукту стартапу за міжнародною класифікацією товарів	Товари здоров’я та безпеки
6. КВЕД, до якого може належати дане виробництво	Секція F, клас 43.99
7. Очікувана потужність стартапу	Мала

8. За масштабом виробництва	Одиничні, серійні
9. За рівнем спеціалізації	Багатопротильний
10. За ресурсами, що споживатимуться	Капіталомістний, працемістний
11. За чисельністю персоналу	малий
12. Бажане географічне розташування - потужностей стартапу; - офісу стартапу; - збутової мережі; - постачальників комплектуючих	<ul style="list-style-type: none"> - Всі області України - м. Київ - Всі області України
13. Місце ідеї у ланцюжку цінностей інноваційного процесу	Місце у ланцюжку цінностей характеризується обраною моделлю підприємства, в нашому випадку це поєднання моделей B2B та B2C
14. Гранична корисність ідеї стартапу	Збереження тепла
15. Бізнес-модель стартапу	B2B або B2C
16. Конкуренти вітчизняні (ціна, на якому етапі реалізації знаходяться, основні конкурентні переваги, фактори успіху)	Відсутні
17. Конкуренти іноземні (ціна, на якому етапі реалізації знаходяться, основні конкурентні переваги, фактори успіху)	Можливі, але ціна за їх послуги значно вища
18. Ключові фактори успіху стартапу	Збереження екології
19. Споживачі (основні на етапі впровадження, групи, орієнтовна чисельність)	Юридичні особи (Київпастрас, обл. ради) – 24 Фізичні особи Юридичні особи
20. Планова кількість продукту розробки для першого етапу реалізації	10 одиниць
21. Мінімальна кількість виробництва за методом точки беззбитковості	2,11 м3/місяць
22. Споживачі на етапі розвитку	Юридичні особи (Київпастрас, обл. ради) – 5-6 Фізичні особи - до 2000 Юридичні особи – до 100
23. Споживачі на етапі зрілості	Юридичні особи (Київпастрас, обл.

	ради и т.д.) – 1 000 Фізичні особи - до 8000 Юридичні особи – до 500
24. Конкурентна ціна на продукт стартапу	20 тисяч гривень за м ³
25. Плановий рівень рентабельності при реалізації продукту	35%
26. Капіталовкладення в проект	3 375 гривень
27. Строк окупності проекту	22 місяці
28. Джерела фінансування	Інвестиції, власний капітал
29. Основні компоненти продукції стартапу (їх доля у готовому товарі, ступінь готовності компонентів у наявному виробництві)	Піноскло (обрізки)
30. Потенційні постачальники складових компонентів розробки (виділити вітчизняних і закордонних, плановий обсяг замовлень, наявна потужність постачальника	ООО «Технологія » м. Шостка 10...5 м ³ Потужність: 150 000 м ³ /рік
31. Планове місце реалізації результату розробки (місце, планова доля реалізації продукту через це місце)	Офіс - 25% Сайт – 75%
32. Наявність посередників при реалізації (так, ні, орієнтовні посередники, форми оплати їх діяльності)	Так (реклама)
33. Методи просування результатів розробки на ринок	- Пропаганда - Реклама - Стимулювання збуту

Місце у ланцюжку цінностей характеризується обраною моделлю підприємства, в нашому випадку це поєднання моделей B2B та B2C.

Продуктом є теплоізоляційний матеріал та його встановлення.

Технологія виготовлення сировини є традиційною технологією виготовлення піноскла із компонентів для склопромисловості, з подальшою їх варкою у скловарних печах та вспінюванням у тунельній печі.

Технологія виготовлення продукту базується на технології виготовленні теплоізоляційної насипного матеріалу в міжстінні площини.

Розробники мають академічний рівень (**кваліфікацію**) бакалавра *хімічної технології силікатних тугоплавких неметалічних матеріалів*.

Планований обсяг виробництва

Місяць	січень	лютий	березень	квітень	травень	червень	липень	серпень	вересень	жовтень	листопад	грудень
Плановий випуск в шт.	10	15	20	20	20	30	25	20	15	20	35	20

1 шт – 3 м³, тоді річний план 750 м³

Джерелом сировини є завод піноскла у місті Шостка. Сировиною є крихта піноскла (пінокрихта).

Пінокрихта виробляється з того ж матеріалу, що й блоки піноскла. Тому має всі якості блоків: негорючість, добрі теплоізоляційні властивості, нульове водопоглинання, хімічна та біологічна стійкість, довговічність, легкість. Тому може використовуватись практично всюди, де застосовуються блоки піноскла чи насипні утеплювачі. Однак у цього виду утеплювача є суттєві **конкурентні переваги**:

1. Простота використання. Від будівельників, які виконують роботи, не вимагається ні особливих знань та вмінь, ні використання яких-небудь спеціальних розчинів, клеїв, матеріалів. Роботи з пінокрихтою подібні до робіт з буд-яким іншим насипним утеплювачем.
2. Утеплення пінокрихтою — економічно найвигідніший спосіб утеплення.

Споживачем є групи людей, які володіють малим бізнесом, власною худобою і потребують утеплення малих архітектурних форм. Вартість розробки, яка включає в себе створення експериментального зразка, збір та обробку технологічних даних та модифікація продукту, складає 3 тисячі 375 гривень.

Розрахунок техніко-економічних показників

1. Річний випуск продукції:

$$V_p = 750 \text{ м}^3/\text{рік}$$

2. Чисельність персоналу за списком:
 $Ч = 2$ особи.
3. Капіталовкладення:
 $K = \text{Об.з.} + \text{О.з.} = 407000 + 195000 + 360000 = 962\,000$ грн.
4. Вартість розробки (собівартість):
 $C = A + \text{Об.з.} = 475000$ грн.
5. Собівартість одиниці продукції:
 $C_{\text{од}} = \frac{475000}{750} = 633,3 \text{ грн/м}^3.$
6. Ціна за 1 м^3 продукції становитиме $1\,100$ грн/ м^3 .
7. Прибуток:
 $\Pi = Ц - C = (1100 \cdot 750) - 475000 = 350000$ грн/рік.
8. Рентабельність:
 $R = \frac{\Pi}{C} \cdot 100\% = 73,6 \%$
9. Економічний коефіцієнт:
 $E = \frac{\Pi}{K} \cdot 100\% = 36,6\%$
10. Період повернення капіталовкладень:
 $T_{\text{пов}} = \frac{K}{\Pi} \approx 2,7$ років
11. Фондовіддача:
 $\Phi В = \frac{Ц}{\Phi_{\text{ср}}} = 2,29$ грн/грн
12. Фондоємність:
 $\Phi \epsilon = \frac{1}{\Phi В} = \frac{1}{2,29} = 0,43$ грн/грн

8.2 Розвиток та впровадження стартап-проекту

Повна інформація щодо розвитку та впровадження стартап-проекту наведено в додатку Б.

ВИСНОВКИ

В магістерській дисертації розроблено середнє підприємство «PINOSKLO», що виробляє тепло- та звукоізоляційні блоки з відходів виробництва листового скла, а також запропоновано інноваційний стартап проект з використання залишків виробництва піноскла для утеплення малих архітектурних форм. Прибуток виробництва після введення стартап прокту збільшується на 350 000 грн/рік. Виробництво піноскла дуже прибуткове. Можна наполягати на економічній доцільності відродження в Україні виробництва піноскла з використанням новітніх досягнень науки і технології.

Процес одержання піноскла оснований на швидкому інтенсивному нагріванні вихідної шихти, що складається з меленого скла і антрациту, а також з відходів листового скла. При цьому мають місце складні фізико-хімічні і тепло-масообмінні процеси. Якість кінцевого виробу багато в чому буде залежати від оптимальності температурного поля.

Методом диференціального термічного і термогравіметричного аналізів вивчені фізико-хімічні процеси, що відбуваються в шихті при термічній обробці. Вивчена динаміка спінювання шихти. На структуру піноскла, і як наслідок, на експлуатаційні характеристики кінцевого продукту, найбільший вплив мають температура витримки і її тривалість. Для їх визначення була проведена серія експериментів, в яких варіювалися температура і тривалість випалу. Встановлено, що оптимальними для виготовлення піноскла буде температура $(855 \pm 5)^\circ\text{C}$ і тривалість витримки 20 ± 2 хвилини. Саме за таких умов структура піноскла – дрібно-коміркова.

Для досягнення симетрії температурного поля у виробі варто застосувати асиметричний нагрів. Визначено тепловий режим, при якому нагрів йде симетрично. Для практичних цілей рекомендовано тривалість перебування форми на кожній позиції скоротити до 9 хв. Після досягнення температури в шарі шихти біля 700°C , початку інтенсивного спінювання і збільшення товщини виробу проводиться термостатування. Після нього

здійснюється інтенсивне охолодження для стабілізації піни. Температура газового простору зверху повинна бути знижена до 700 °С, знизу - до 500 °С.

Тривалість перебування піноскла в температурному інтервалі активного спінювання (800-850 °С), складає 27-30 хвилин, що забезпечить постійність температури усіх прошарків піноскла, забезпечить гомогенність структури.

Дільницю з виробництва піноскла планується облаштувати у типовому цеху з виробництва листового скла. Цех має габарити 36×60 м. Будівля – 2-х пролітна. Ширина кожного прольоту 18 м. В одному прольоті здійснюється виробництво листового скла за типовою схемою.

Для виробництва піноскла використовуються відходи виробництва листового скла. Можливе також використання власного зворотного склобою або браку основного виробництва машинно-ванного цеху. В роботі виконаний проект печі спінювання і печі відпалу.

В температурному інтервалі 840÷860 °С і при тривалості спінювання 20÷30 хвилин можна отримати піноскло, яке за своїми характеристиками може бути рекомендоване для промислового виготовлення.

Дане виробництво забезпечить наступні експлуатаційні характеристики: об'ємну масу - 0,15÷0,2 г/см³; міцність на згин - 0,2÷0,5 МПа; водопоглинання – 2,0÷4,5 %; ударну в'язкість - 0,005÷0,015 Дж/см²; пористість - 91÷95 %.

Продуктивність дільниці складатиме:

у виробках - 432 штуки за добу, або 157680 штук за рік;

за об'ємом – 12,95 м³ за добу або 4730 м³ за рік;

за масою – 2592 кг за добу, або 946 т за рік.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Шилл Ф. Пеностекло производство и применение. – Москва: Издательство литературы по строительству, 1965. - 20 с.
2. Китайгородский И. И., Кешишян Т. Н.. Пеностекло. - М.: Промстройиздат, 1953. – 30 с.
3. Штірц Л. Ю., Феськова М. Ю. Використання склобою в виробництві піноскла// Освіта, наука, виробництво: зб. пр. V Міжнар. студ. форуму / Білор. держ. технолог. ун-т: БДТУ, 2011.- С. 185-186.
4. Кетов А. А. Перспективи піноскла в житловому будівництві// Будівельні матеріали. - 2016. - № 3. - С. 79-81.
5. Giovanni Scarinci, Giovanna Brusatin, Enrico Bernardo "Glass Foams". - Bologna, Italy. - 2006. – 2 с. (3)
6. Кетов А. А., Пузанов І. С., Сауліна Д. В. Досвід виробництва піноскляних матеріалів з склобою // Будівельні матеріали. - 2007. - № 3. - С. 70-72.
7. Кулаєв Н. С., Гаркаві М. С. Піноскло з склобою // Будівельні матеріали. - 2007. - № 3. - С. 74-76.
8. Fernandes H. R., Tulyaganov D. U., Ferreira J. M. F. Production and characterization of glass ceramic foams from recycled raw materials// Advances in Applied Ceramics. - 2009. - Vol.108, № 1. - P. 9-13.
9. Піноскло [Електронний ресурс]. – 2015. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.peno-steklo.com/kupiti-pinosklo,-prodazha-pinoskla,-pinosklo-xarakteristiki/>. (4)
10. Сертифікати випробувань піноскла [Електронний ресурс]. – 2016. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.pinosklo.com/ua/dokumentatsiya.html>
11. Aaboe R., Oiseth E. No Access Foamed Glass - An Alternative Lightweight and Insulating Material. - Oslo, Norway: July 07, 2015. – 5 с. (6)
12. Піноскло: виробництво в Україні [Електронний ресурс]. – 2010. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.pinosklo.com>. (7)

13. Стаховська Н. Е., Червоний А. І. Піноскло з несортованих відходів скла // Будівельні матеріали. - 2012. - № 11. - С. 24-26.
14. Вайсман Я. І., Кетов А. А., Кетов П. А. Вторинна переробка піноскла при виробництві піносклокристаличних плит // Будівельні матеріали. - 2017. - № 5. - С. 56-59.
15. Демидович Б. К. «Пеностекло». - Минск: Наука и техника, 1975. – с. 20-150.
16. Сосунов Е. Г. Пеностекло. На пути из прошлого в будущее // Архитектура и строительство. 2004. № 5. С. 110–111.
17. Павлушкина Т.К., Кисиленко Н.Г. Использование стекольного боя в производстве строительных материалов// Стекло и керамика. - 2011. - № 5. - С. 27–34.
18. Бобкова Н. М., Трунец Н. А., Батаева Е. Г.. Изменение прочности стекол при различных режимах варки // Изв. АН БССР, 1968, № 3. – С. 48—49.
19. Кулаев Н.С., Гаркави М.С. Пеностекло из стеклобоя// Строительные материалы. - 2007. - № 3. - С. 74–76.
20. Руденко В. С., Порай-Кошиц Е. А.. В сб. «Структурные превращения в стеклах при повышенных температурах». - М.—Л.: Наука, 1965. - С. 188—192.
21. Fernandes H. R., Tulyaganov D. U., Ferreira J. M. F. Production and characterization of glass ceramic foams from recycled raw materials// Advances in Applied Ceramics. - 2009. - Vol.108, No. 1. - P. 9–13.
22. Спиридонов Ю.А., Орлова Л.А. Проблемы получения пеностекла// Стекло и керамика.- 2003. - № 10.- С.10–11.
23. Пузанов С. И., Кетов А. А. Комплексная переработка стеклобоя в производстве строительных материалов// Экология и промышленность. - 2009. № 12. С. 4–7.
24. Патент №92076. Чехословакия. 2121493/33. заявка № 23 . Способ получения пеностекла/ Демидов Б. К., Садченко Н. П. /Минский научно-

исследовательский институт строительных материалов/ Б. К. Демидов, Н. П. Садченко/27.12.76/.

25. Patent №1803693. United States of America. US2890173 A. Production of cellulated silica/ Anderson Herbert H, Ford Walter D/ Pittsburgh Corning Corp / 19.08.1953/.

26. Мусафирова Г.Я., Мусафиров Э.В., Лыщик М.В. Блочное пеностекло на основе стеклобоя, доломитовой муки и жидкого стекла// Техника и технология силикатов. - 2017. - № 1. - С. 7–11.

27. Beyersdorfer P. Glashuttenkunde. Deutscher Verlag fur Grundstofindustrie. - Leipzig, 1984. - P. 333—337.

28. Корнілович Б.Ю., Андрієвська О.Р., Племянніков М.М., Спасьонова Л.М. Фізична хімія кремнезему і нанодисперсних силікатів: навчальний посібник за ред чл.-кор. НАН України Б.Ю. Корніловича. – К.: «Освіта України», 2013. – 178 с. (21)

29. Glass ceramic foams from coal ash and waste glass: production and characterization/ A. R. Boccaccini et al.// Advances in Applied Ceramics. - 2006. - Vol. 105, No. 1. - P. 32–39.

30. Fernandes H. R., Tulyaganov D. U., Ferreira J. M. F. Preparation and characterization of foams from sheet glass and fly ash using carbonates as foaming agents // Ceramics International. - 2009. - Vol. 35, No. 1. - P. 229–235.

31. Preparation of foam glass from waste glass and fly ash / J. Bai et al.// Materials Letters. - 2014. - Vol. 136. - P. 52–54.

32. Preparation of glass ceramic foams for thermal insulation applications from coal fly ash and waste glass / M. Zhu et al.// Construction and Building Materials. - 2016. - Vol. 112. - P. 398–405.

33. Демидович Б. К. Сб. «Стеновые и теплоизоляционные материалы и изделия». – Минск: «Вышэйшая школа», 1969. - С. 244—249. (23)

34. Демидович Б.К., Пилецкий В.И. Влияние фазовой неоднородности и напряжений в пеностекле на стабильность его структуры /

В республ. межведомств, сб. "Стекло, ситаллы и силикатные материалы", вып. 2. - Минск: Выш. шк., 1974.- С. 119-123.

35. Patent №1803693. United States of America. US2890173 A. Production of cellulated silica/ Anderson Herbert H, Ford Walter D/ Pittsburgh Corning Corp.

36. Patent № 2002065. France. EP2002065 A2. High strength foam glass/ Bo Wang/ World Minerals, Inc.

37. Patent №1803693. England.UK20140021419 A1. UK 14/110,152. Method for Producing Foam by Recycling a Waste Glass Mixture/ Ralf Baier, Rainer Daniel/ TDC Trade Development and Construction Ltd./23.01.14/

38. Patent №1803693. Poland . EP1803693 A1. EP20040809010. Method for producing calibrated granulated foam glass /Andrei Adolfovich Zinoviev, Mikhail Petrovich Dudko, Valentin Zinovievich Leonidov/ 4.07.2007/

39. Patent №1803693. Germany. EP0480929 B1. EP19900902663. Manufacture of foam glass/ Keith Russel Mcneill/ VERT Investments Limited/ 09.04.1995/

40. Лотов В. А., Кривенкова Е. В. Кинетика процесса формирования пористой структуры пеностекла// Стекло и керамика. - 2002. - № 3. -С. 14–17.

41. ТУ У В 2.7-26.1-34560391-014:2010 зі змінами №1, 2 «Вироби теплоізоляційні з піноскла. ТУ»

42. ДСТУ Б В.2.7 – 157:2011 Будівельні матеріали. Пісок. Технічні умови.

43. ГОСТ 5100–85. Сода кальцинована технічна. Технічні умови. Введ. з 01.01.1985 - Москва: Стандартиком, 2016. – С. 25

44. ГОСТ 6318–77. Натрій сірчаноокислий технічний. Технічні умови. Введ. з 01.01.1979 - Москва: Стандартиком, 2016. - С. 22.

45. ТУ 21 БССР 296–89. Крейда мілкогранульована. Технічні умови. Введ. з 01.01.1999 – М. - С. 1.

46. ГОСТ 23673.0–79. Доломіт для скляної промисловості. Загальні вимоги до методів аналізу. Введ. з 01.01.1981 – М.: Стандартиком. - С. 12.

47. Brusatin G., Bernardo E., Scarinci G.. Production of foam glass from glass waste. - Padova, Italy, 2016. – 10 с.

48. Лукінюк М.В. Контроль і керування хіміко-технологічними процесами: У кн. 1. Методи та технічні засоби автоматичного контролю хіміко-технологічних процесів: навч. посіб. для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямком: «Хімічна технологія та інженерія» / М. В. Лукінюк. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 336 с.

49. «Охорона праці» в дипломних проектах і роботах бакалаврів хіміко-технологічного і біотехнології та біотехніки ф-тів / Уклад.: А. Т. Орленко, Н.А. Приховнік, Ю.О. Полукаров – К.: НТУУ «КПІ», 2011.- 33 с.

50. ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень».

51. СНіП II-04-05-91. «Опалювання, вентиляція та кондиціонування».

52. ДБН В.2.5-28-2006 «Природне та штучне освітлення».

53. ДСН 3.36.042-99 «Санітарні норми у виробничих приміщеннях».

54. ДНАОП 0.01-1.01-95 «Правила пожежної безпеки в Україні.